

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra výrobních strojů a konstruování

**Aplikace nedestruktivních metod technické diagnostiky pro objektivizaci  
technického stavu letadel**

**Nondestructive Testing Application for Aircraft Technical Condition  
Objectification**

Student:

Bc. Dariusz Cymerys

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Blata, Ph.D.

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra výrobních strojů a konstruování

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Dariusz Cymerys**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství

Specializace: 72 Technická diagnostika, opravy a udržování

Téma: **Aplikace nedestruktivních metod technické diagnostiky pro objektivizaci  
technického stavu letadel  
Nondestructive Testing Application for Aircraft Technical Condition  
Objectification**

Zásady pro vypracování:

Vysoké nároky na bezpečnost a bezporuchovost letadel kladou vysoké požadavky na aplikaci metod technické diagnostiky pro objektivizaci technického stavu. Zabývejte se proto možnostmi použití standardních, ale i nových nedestruktivních metod na letadla a jejich konstrukční celky a analyzujte jejich možnosti pro odhalení necelistvostí. Pro potřeby nedestruktivní diagnostiky vyzkoušejte možnosti použití nové metody magnetické paměti kovů (MMM) a také termovizní měření. Získané výsledky analyzujte a zhodnoťte jejich vhodnost použití.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte potřebná měření.
5. Proveďte konkrétní provozní vyhodnocení.

Další podrobnější specifikace provede vedoucí práce a firma JOB AIR - Technic a.s.



Seznam doporučené odborné literatury:

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

HELEBRANT, F., ZIEGLER, J., MARASOVÁ, D. *Technická diagnostika a spolehlivost I - Tribodiagnostika*. 1. vydání, Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2001, 158 s. ISBN 80-7078-883-6.

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

MILÁČEK, S.: *Měření a vyhodnocování mechanických veličin*. ČVUT v Praze 2001, 231 s., ISBN 80.01-02417-2

*Podkladové materiály - AJOB AIR - Technic a.s., Boeing Company*

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

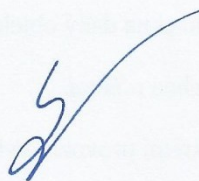
Konzultant diplomové práce: prof. ATH, dr hab. Janusz Juraszek

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář  
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### **Místopřísečné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 20.5.2013

Dariusz Cymerys

.....

Podpis

**Prohlašuji, že**

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít
- (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě ..... 20.5.2013

Dariusz Cymerys  
.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Dariusz Cymerys

Adresa trvalého pobytu autora práce: č.p. 382, 739 56 Ropice

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

CYMERYS, D. *Aplikace nedestruktivních metod technické diagnostiky pro objektivizaci technického stavu letadel: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2013. 72 s. Vedoucí práce: Blata, J.

Diplomová práce se zabývá použitím nedestruktivních metod technické diagnostiky na letecké technice. Popisuje obecně možné vady a provozní porušení, které se mohou vyskytnout v materiálu s přihlédnutím ke specifickým materiálům používaných v letectví. Dále prezentuje přehled všech standardních nedestruktivních metod technické diagnostiky, které nacházejí uplatnění v údržbě letadel. V práci jsou podrobněji popsány inovativní metody oboru: metoda magnetické paměti kovu a termovize. U obou se vychází z teoretických předpokladů, které byly prakticky odzkoušeny v reálném prostředí organizace pro údržbu letadel. Výsledky praktické aplikace byly analyzovány a byla zhodnocena vhodnost jejich použití.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

CYMERYS, D. *Nondestructive Testing Application for Aircraft Technical Condition Objectification: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design, 2013, 72 p. Thesis head: Blata, J.

Master thesis is dealing with nondestructive testing application for aircraft. It describes in general possible defects and operation damages in material and it focuses on particularity of materials used in aviation. It presents an overview of all the standard nondestructive inspection methods which are applicable in aircraft maintenance. The thesis describes more precisely innovative methods of the branch: metal magnetic memory and thermography. In both it is dealing with theoretical preconditions which were practically tested in aircraft maintenance organization environment. Practical application results were analyzed and the suitability of usage was evaluated.

## OBSAH

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>1 LEGISLATIVNÍ VYMEZENÍ NDT V LETECTVÍ.....</b>	<b>11</b>
<b>2 VADY MATERIÁLU A PROVOZNÍ PORUŠENÍ MATERIÁLU.....</b>	<b>13</b>
2.1 VADY MATERIÁLU .....	13
2.1.1 Povrchové a makroskopické vady .....	14
2.1.2 Vady mikrostruktury .....	17
2.1.3 Typické vady kompozitních materiálů .....	19
2.2 PROVOZNÍ PORUŠENÍ MATERIÁLU .....	20
2.2.1 Únava materiálu .....	20
2.2.2 Koroze .....	22
2.2.3 Tečení materiálu .....	23
2.2.4 Opoťebení materiálu .....	24
2.3 TYPICKÁ POŠKOZENÍ ČÁSTÍ LETADLA .....	25
<b>3 BĚŽNÉ METODY NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ V LETECTVÍ .....</b>	<b>29</b>
3.1 VIZUÁLNÍ METODY .....	30
3.2 KAPILÁRNÍ METODY .....	33
3.3 METODA ROZPTYLOVÝCH TOKŮ .....	36
3.4 METODA VÍŘIVÝCH PROUDŮ .....	38
3.5 ZKOUŠKY ULTRAZVUKEM.....	42
3.6 PROZAŘOVÁNÍ .....	45
3.7 AKUSTICKÉ METODY .....	49
3.8 HOLOGRAFIE A SHEAROGRAFIE .....	51
<b>4 INOVATIVNÍ METODY NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ V LETECTVÍ .....</b>	<b>52</b>
4.1 METODA MAGNETICKÉ PAMĚTI KOVU .....	52
4.1.1 Fyzikální princip a možnosti použití .....	52
4.1.2 Využití metody v letectví .....	53
4.1.3 Praktická aplikace na letecké technice .....	54
4.2 TERMOVIZE .....	56
4.2.1 Fyzikální princip.....	56
4.2.2 Aplikace v letectví.....	58
4.2.3 Předpisová základna .....	59
4.2.4 Průběh měření.....	64
4.2.5 Výsledky měření a jejich hodnocení .....	67
<b>5 ZÁVĚR .....</b>	<b>70</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>71</b>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

<b>Zkratka</b>	<b>Cizí výraz</b>	<b>Český výraz</b>
AMM	Aircraft Maintenance Manual	Příručka pro údržbu letadla
BOAC	British Overseas Airways Corporation	Britská společnost zámořské letecké dopravy
EASA	European Aviation Safety Agency	Evropská agence pro bezpečnost v letectví
ES		Evropské společenství
GECAS	GE Capital Aviation Service	
LCD	liquid crystal display	displej z tekutých krystalů
MMM	Metal Magnetic Memory	Magnetická paměť kovu
NDT	Nondestructive Testing	Nedestruktivní zkoušení
NTSC	National Television System Committee	
PAL	phase alternating line	
RCA	Radio Corporation of America	Americká rádiová korporace
S.A.S.	Société par Actions Simplifiée	zjednodušená akciová společnost
SECAM	séquentiel couleur à mémoire	postoupení barevné informace do paměti
TFT	thin-film transistor	tenkovrstvý tranzistor
WO	Work Order	Pracovní příkaz



## ÚVOD

Letectví je obor, ve kterém se bezpečnost považuje za prioritu. Dopravní letoun ve své složitosti představuje soustavu mnoha propojených prvků, které se vzájemně ovlivňují a určují konečnou spolehlivost celého stroje. Cílem všech subjektů působících v letectví, konstruktéry a výrobcem počínaje, přes provozovatele, úřady, organizacemi oprávněnými k údržbě konče, je zvyšování této spolehlivosti v co možná největší míře. Byť lze spolehlivost mnoha systémů letounu zvýšit zálohováním, které je v některých případech až čtyřnásobné, vyskytují se zde i prvky a soustavy, jejichž zálohování je jednoduše neproveditelné. Navíc každý zálohovaný systém zvyšuje prázdnou hmotnost letadla, vede tedy ke snížení užité hmotnosti a přepravní kapacity, což je z ekonomických důvodů pro přepravce nepřínosné. Snaha o zvýšení provozní bezpečnosti je pak na bedrech údržbové organizace, která v rámci platné legislativy pečuje o zachování vysoké míry spolehlivosti celého stroje. Tento fakt je obzvláště důležitý pro kritické systémy a další letadlové celky, jejichž porucha by mohla vést k nehodě, případně až ke katastrofě se ztrátami na lidských životech. Jejich stav je proto třeba bedlivě sledovat a používat metody, které zajistí objektivní pohled především na možný vývoj poruch. Použití nedestruktivních metod technické diagnostiky na dopravním letounu se zaměřuje hlavně na nosné prvky konstrukce, dále pak potah a jiné komponenty, které jsou vystaveny atmosférickým vlivům a v neposlední řadě na pracovní části motoru, ať už turbodmychadlového, turbovrtulového či pístového. Stávající metody kontroly jsou především díky rychlému vývoji digitálních technologií velmi pokročilé, avšak stále probíhá vývoj nových metod, které by byly schopny dodatečně zvýšit spolehlivost v dopravním letectví, které je stále považováno za nejbezpečnější způsob dopravy.

Společnost JOB AIR Technic a.s. se sídlem na ostravském Letišti Leoše Janáčka v Mošnově, v prostorách které byla provedena praktická měření popsána v této práci, je schválenou organizací pro údržbu letadel. Její historie sahá roku 1993, kdy byla zahájena údržba letounů LET 410 a SAAB 340. Od roku 2008 je v provozu nový hangár, který patří mezi největší ve Střední Evropě, díky němuž je umožněna obsluha větších strojů, typů Boeing 737 všech verzí a rodiny strojů Airbus 320. Již od roku 2004 je společnost držitelem evropského certifikátu pro údržbovou základnu, o čtyři roky později tento

rozšířila o certifikát pro výcvik osvědčujícího personálu v údržbě letadel. V současnosti může provádět údržbu letounů zapsaných v leteckých rejstřících zemí Evropské unie, dále Ruska, Bermudských ostrovů a Aruby. V roce 2012 firma otevřela druhý hangár, sloužící jako hangár velkých dopravních letadel. Od samotného začátku působnosti společnosti se využívá nedestruktivních metod technické diagnostiky, taktéž nyní je k dispozici akreditované pracoviště NDT s kvalitním vybavením a zkušenými pracovníky. Organizace je oprávněna k provádění zkoušení pomocí všech šesti běžných metod.

# 1 LEGISLATIVNÍ VYMEZENÍ NDT V LETECTVÍ

Pro tvorbu této kapitoly byla využita literatura [13], [18].

Organizace oprávněné k údržbě letadel musí pracovat podle předpisů, které poměrně přesně popisují jejich pravomoci. V zemích Evropského společenství se jedná především o Nařízení komise (ES) č. 2042/2003 ze dne 20. listopadu 2003 o zachování letové způsobilosti letadel a leteckých výrobků, letadlových částí a zařízení a schvalování organizací a personálu zapojených do těchto úkolů. Toto nařízení je základem pro další legislativu, např. směrnice, které upřesňují jednotlivé zápisy. Na dodržování těchto předpisů dohlíží Evropská agentura pro bezpečnost v letectví (EASA) skrz letecké úřady členských států, které také schvalují dané organizace pro údržbu podle Části 145 a vydávají oprávnění pro personál podle Části 66 zmíněného nařízení. Kromě toho jsou v nařízení popsány také požadavky na organizace pro výcvik personálu v údržbě letadel, a to v Části 147 a další důležité předpisy shrnuté v Části M. Právní dokument je rozdělen na Oddíl A určený pro žadatele a Oddíl B pro letecké úřady.

Všechny pracovní postupy jsou dány v příručkách pro údržbu (AMM – Aircraft Maintenance Manual). Nejinak je tomu u nedestruktivního zkoušení. Samotný výrobce určuje jak postup provádění zkoušek, tak jejich vyhodnocení a další činnosti v případě nalezení poškození. Záleží také na provozovateli letadla, zda aplikuje postupy navržené výrobcem nebo je zpřísní pro zvýšení bezpečnosti provozu. Naopak jakékoli snížení požadavků pod limity dané výrobcem není možné. Pro NDT je vždy vymezen speciální oddíl, neboť tyto zkoušky mohou provádět pouze oprávnění pracovníci a tímto je zajištěno, že specialistická měření budou provedena kvalifikovaným personálem. Jednoduché vizuální prohlídky jsou naopak zařazeny u jiných postupů pro daný letadlový celek, takže je může provádět technik s průkazem daného druhu, což je určeno umístěním objektu (drak, motor, příp. avionika).

Úkony pro provedení údržby letounu v požadovaném rozsahu jsou popsány v pracovních příkazech (WO – Work Orders), ty jsou většinou dále specifikovány v několika Job Cardech (viz Obr. 1.1), jejichž množství záleží na obtížnosti úkolu. Provedení úkonu potvrzuje razítkem a svým podpisem oprávněný personál, který má kromě patřičného

průkazu vydaného leteckým úřadem také pověření od dané údržbové organizace pro uvolňování do provozu určitých letadlových celků. Jestliže se na zkoumaném díle objeví nálezy – poruchy nebo vady, postupuje se dál podle příručky výrobce, která je schválena také leteckým úřadem, kde je přesně specifikováno, jak závažné nálezy lze ponechat bez ingerence do další prohlídky, případně jakým způsobem provést opravu nebo přímo výměnu většího celku.

<b>JOB CARD</b>		WP: W2301	WP Bar Code	Out: POLET AIR COMPANY
<b>jebair</b>		Seq: 257016	Seq Bar Code	A/C Type: Saab 340
Task: 5711-501-021				A/C SN: 340B-232
				A/C Reg: VQ-BGC
Model Series	Ident Code	Effect Code/PSN	Block Number	Basic Number
				Line Number
Start:	Reference:		Stop:	
1707095			188735	
Work Required:				
Special detailed inspection ( NDT X-RAY ) of lower forward splice fitting BL 0.0 for cracks.				
<b>Special detailed inspection ( NDT X-RAY ) of lower forward splice fitting BL 0.0 for cracks</b>				
Action:		Date:	Performed by:	
Component Changes				
ON	PN	SN	Position/Location/Size	
OFF				
ON				
OFF				
ON				
OFF				
Defect Found?		Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	NPC No:	Found by:
Material				
PN	Description	QTY	Used QTY	Used SN/BN
Certification				
Date	Sign and Stamp	Double Check (if required) <input type="checkbox"/>	Total Time (hours only):	
Certifies that work specified, except as otherwise specified, was carried out in accordance with PART 145 and in respect to that work the Aircraft/Aircraft component is considered ready for release to service.				
WP: W2301 JAT: 702-004		Sequence: 257016	Printed by: ZDENEK ZARSKY	Print Date: 15.3.2013

Obr. 1.1 Job Card pro nedestruktivní kontrolu prozařováním připraven na vyplnění

## **2 VADY MATERIÁLU A PROVOZNÍ PORUŠENÍ MATERIÁLU**

Pro tvorbu této kapitoly byla využita literatura [1], [2], [3].

Nedestruktivní metody technické diagnostiky jsou určeny k zjišťování materiálových necelistvostí bez porušení jejich makrostruktury a mikrostruktury a změny nebo ovlivňování jejich užitných vlastností. Necelistvosti mohou vzniknout při výrobě, pak jsou během kontroly kvality vyřazeny ty díly, u kterých byly překročeny dané limity, nebo během provozu vlivem zatížení. V případě takových vad materiálů z výroby, které prošly kontrolou kvality, takže splňují dané požadavky, ale daný díl je mechanicky zatěžován, existuje zvýšené riziko vzniku nebezpečné necelistvosti, která může ovlivnit bezpečnost provozu letadla. Proto je vhodné se zmínit jak o materiálových vadách, tak o defektech vznikajících za provozu.

Třídění vad je možné podle různých hledisek: druhu vad, příčin vzniku, způsobu a stadia jejich zjišťování a dalších kritérií. V technické praxi se nejběžněji používá třídění podle druhu, hlavně proto, že je nejprehlednější. Z tohoto hlediska jsou vady tříděny do jednotlivých skupin:

1. Vady rozměrů a Vady tvaru a polohy,
2. Vady povrchu,
3. Necelistvosti hmoty,
4. Vady zjišťované zvláštními laboratorními zkouškami.

### **2.1 Vady materiálu**

Pro tvorbu této podkapitoly byla kromě výše uvedené využita literatura [11].

Materiálovou vadou je taková necelistvost, která vznikla během primární výroby případně následného zpracování materiálu předtím, než se konečný díl dostal do provozu. Obecně je lze rozdělit na vady povrchové, které je možno odhalit vizuálními metodami a vady struktury v makroskopickém nebo mikroskopickém měřítku, byť je toto dělení neúplné vzhledem k rozdílné povaze různých materiálů používaných v leteckém průmyslu. Z provozního hlediska jsou nejnebezpečnější ploché vady, především ty, které sahají až



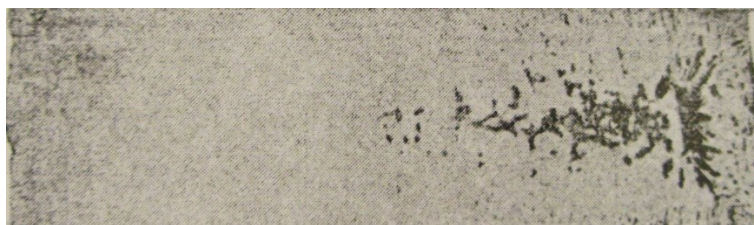
k povrchu a to proto, že se většina kritických napětí vyskytuje právě na povrchu a vada tak má možnost zvětšovat svůj rozsah.

### **2.1.1 Povrchové a makroskopické vady**

Tyto vady nejenom negativně ovlivňují mechanické vlastnosti materiálu, ale mohou se také stát místem iniciace pozdějších lomů, jestliže dojde k zatížení dílu. Níže jsou popsány nejčastější typy vad, které se vyskytují v oceli, jakožto základním strojírenským konstrukčním materiálu.

#### **a) Staženiny**

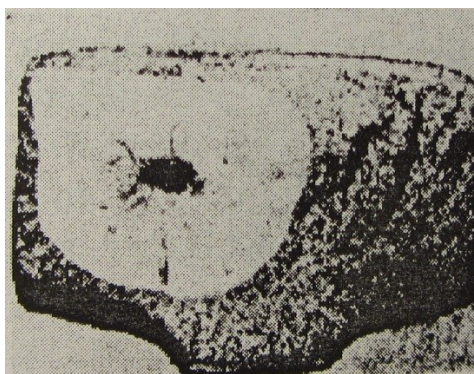
Jsou to rozsáhlé necelistvosti ve válcovaných výrobcích. Mohou být částečně nebo zcela vyplněny struskou. Vada vzniká při tuhnutí oceli v kokilách vlivem zmenšování objemu a lze ji předejít vhodnou volbou kokily a parametrů během lití. Vliv staženiny na funkčnost výrobku záleží na zatížení, u statického zatížení je vliv malý, větší je u namáhání ohybem. Vada (Obr. 2.1) je viditelná zrakem, pokud zasahuje až do čelní plochy vývalku, nejvhodnějším způsobem detekce je ultrazvuková metoda, lze použít i prozařování.



*Obr. 2.1 Soustředná staženina a plynové bubliny v ocelovém ingotu [1]*

#### **b) Vločkové trhliny**

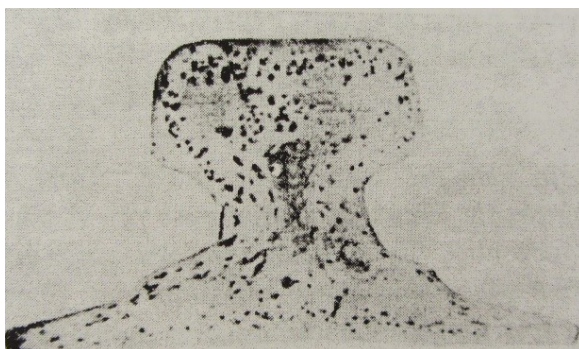
Jedná se o vnitřní plošné necelistvosti s tloušťkou několika desítek milimetrů. Jsou to napěťové trhliny, které vznikají působením makroskopického hnutí spolu s mikropnutím vyvolaným uvolňováním vodíku při chladnutí vývalku. Vločky působí jako vnitřní vruby a jsou obzvláště nebezpečné při cyklickém namáhání, kdy mohou vyvolat vznik a šíření únavových trhlin. Za pomoci NDT se zjišťují ultrazvukovou metodou, nejčastěji pomocí dvojitého čelního sond. Vločková trhlinka je zobrazena na Obr. 2.2.



*Obr. 2.2 Vločková trhлина v hlavě kolejnice [1]*

#### **c) Vycezeniny**

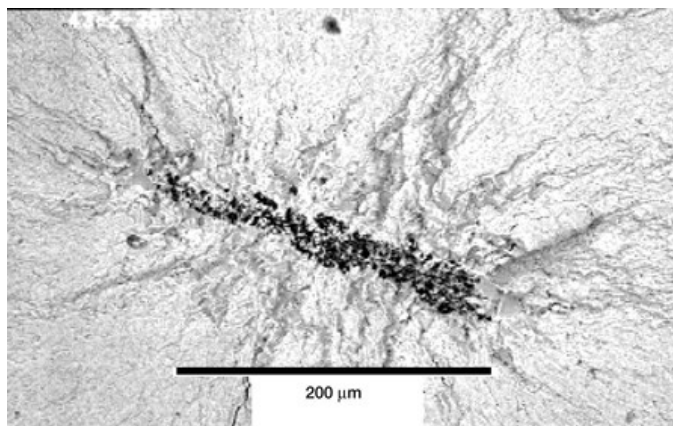
Jsou to makroskopické oblasti se zvýšeným obsahem vměstků fosforu, síry, uhlíku nebo i dalších prvků, vzniklé vlivem segregačních dějů při tuhnutí oceli. Vycezeniny (Obr. 2.3) se považují za vadu, přesahují-li rozsah stanovený technickými podmínkami. Při statickém namáhání se jejich přítomnost nijak neprojevuje, u cyklicky namáhaných dílů snižují mez únavy především u tvarově členitých výrobků. Nedestruktivní zkoušení je možné pomocí ultrazvuku.



*Obr. 2.3 Vycezeniny ve výkovku*

#### **d) Makroskopické nekovové vměstky**

Tímto názvem se označuje cizorodé nekovové částice nebo skupiny částic, často viditelné pouhým okem (viz Obr. 2.4). Jejich zdroji jsou nejčastěji žáruvzdorné hmoty, s nimiž přichází ocel během odlévání a další výroby do styku. Jsou nebezpečné svým náhodným výskytem a jsou příčinou vzniku rozdělení, únavových trhlin a lomů, nebo i lomů po krátkodobém a dlouhodobém namáhání. Pokud je nelze lokalizovat vizuálně, záruku jejich absence v materiálu dává pouze stoprocentní ultrazvuková kontrola.



*Obr. 2.4 Nekovové vměstky v hliníkové slitině, které byly místem iniciace únavového lomu*

*Zdroj: <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/RT/RT2001/5000/5120gabb.html>>*

#### ***e) Podélné trhliny***

Jedná se o nejrozšířenější vadu válcované oceli. Je to necelistvost povrchu probíhající přímočaře a rovnoběžně s osou vývalku. Příčiny vzniku jsou velmi rozmanité. Nakolik mohou být díly s podélnými trhlinami do jisté velikosti staticky zatěžovány, při namáhání krutem, ohybem a cyklicky se trhliny projevují nepříznivě. Výsledný vzhled trhliny po namáhání je zobrazen na Obr. 2.5. Kromě vizuálních metod se aplikují metody magnetické a indukční, především metoda vířivých proudů.

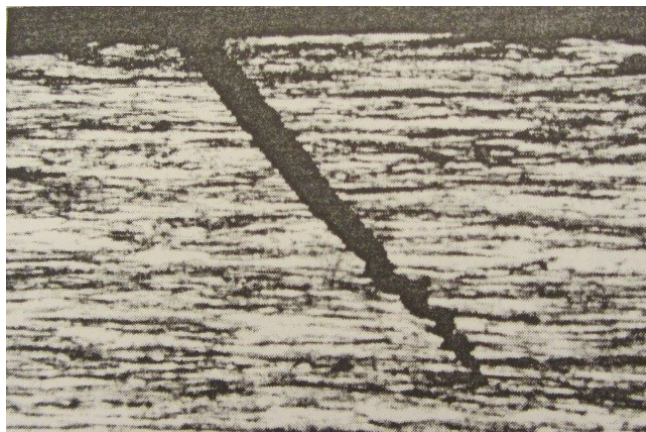


*Obr. 2.5 Podélná trhlina válcované trubky propagována po namáhání*

*Zdroj: <<http://steamofboiler.blogspot.cz/2011/06/cylindrical-part-under-longitudinal.html>>*

#### *f) Příčné trhliny*

Jsou to povrchové necelistvosti s různými parametry, orientace trhliny je přibližně kolmo na směr vláken, jak je zřejmé z Obr. 2.6. Vyskytují se na hranách i stěnách výrobku. Vznikají v prvním údobí tváření, jestliže má materiál sníženou tvářitelnost za tepla. Detekce je stejná, jako v případě podélných trhlin.



*Obr. 2.6 Příčná trhlina vzniklá pnutím v pružinovém drátě [1]*

#### **2.1.2 Vady mikrostruktury**

Vzhledem k vysokým nárokům na bezpečnost v letectví musí výrobce dbát na výběr materiálů, které splňují přísné kvalitativní požadavky. Mikrostrukturální vady kromě zhoršení mechanických vlastností dílu mohou vést k tvorbě větších necelistvostí, které už mohou ohrožovat bezpečnost provozu. Pro zjišťování vad mikrostruktury se používají metalografické, většinou světelné mikroskopy. Materiál lze také zkoušet nedestruktivně s využitím útlumu ultrazvukových vln nebo metodou vířivých proudů.

#### *a) Oduhličení*

Vzniká ochuzením povrchové vrstvy o uhlík. K oduhličení (Obr. 2.7) dochází především při všech ohřevech oceli na vyšší teploty a proto úzce souvisí se vznikem okujů. K zamezení se používá ochranné atmosféry, solné a kovové lázně, případně vhodných obalů nebo ochranných nátěrů. Změnou mikrostruktury oduhličené oblasti se mění i vlastnosti a nastávají podmínky pro vznik povrchových vad, zhoršené jsou také mechanické vlastnosti.

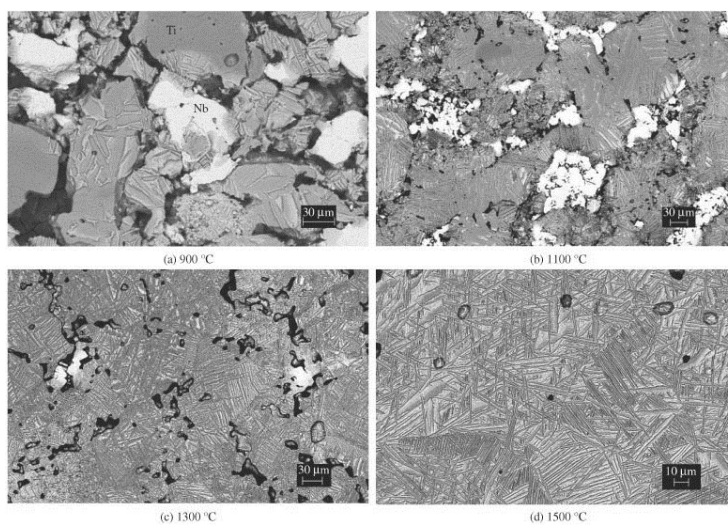




Obr. 2.7 Povrchové oduhličení [1]

### b) *Přehřátí, hrubé karbidické sít'ové a Widmannstättenova struktura*

Pro vznik všech těchto struktur je podmínkou přehřátí, především překročení teploty, ale i setrvání na teplotě, které podmiňuje vytvoření hrubého zrna austenitu, jak je patrné z Obr. 2.8. Jelikož lze tyto vady napravit dalšími procesy tváření, nepředstavují zpravidla rizikový faktor.



Obr. 2.8 Struktury vznikající přehřátím v titanových slitinách určených pro letecký průmysl. Dole vpravo Widmannstättenova struktura

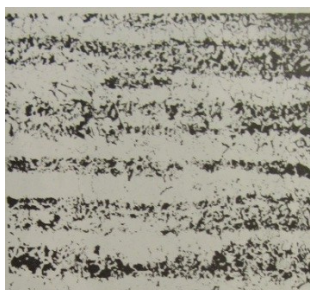
Zdroj: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392005000400015](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392005000400015)>

### c) *Řádkovitost*

Jedná se o nepravidelné uspořádání přítomných strukturních částí do výrazných řádků (Obr. 2.9). Její příčinou je chemická nestejnorodost, vznikající při tuhnutí oceli, která



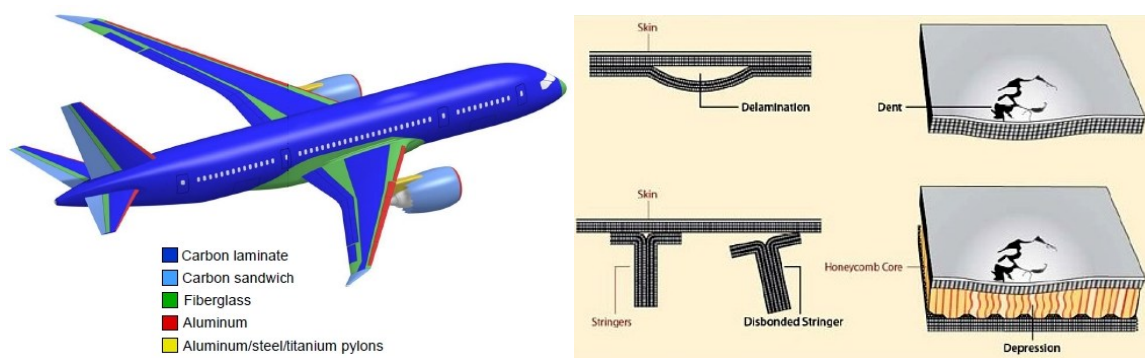
podmiňuje vznik oblastí s různým chemickým složením v pruzích ve směru toku materiálu při tváření za tepla. Vzhledem k nestojné plasticitě v mikroobjemech kovu dochází snadno ke vzniku mikrotrhlin během tváření, u hotových výrobků jsou zhoršeny vlastnosti v příčném směru.



Obr. 2.9 Řádkovitá struktura [1]

### 2.1.3 Typické vady kompozitních materiálů

Kompozitní materiály jsou v současných letounech z hlediska zastoupení druhým nejčastějším materiálem po kovových slitinách (hliník, ocel, titan), na stroji Boeing 787 Dreamliner podíl kompozitu dosahuje dokonce 50% prázdné hmotnosti (Obr. 2.10). V kompozitních materiálech se vyskytují především makroskopické necelistvosti. Jedná se v největší míře o delaminaci, praskliny, vměstky, póry a rozštěpení vláken, dále se lze setkat i se strukturálními vadami, např. malým počtem zpevňujících vláken, chybným směrem jejich uložení nebo nedostačující adhezí složek. U voštinových konstrukcí dochází k odlepení buněk od potahu, viz Obr. 2.10 (vpravo dole).



Obr. 2.10 Vlevo: Zastoupení kompozitních materiálů na potahu letounu Boeing 787 – kromě červené a žluté oblasti

Vpravo: typická poškození kompozitních materiálů – delaminace (nahore) a odlepení (dole)

Zdroj: <[http://www.ahrtp.com/RSS-JSfeeds/AF\\_447\\_composites\\_tail\\_hypercomplexity-6E.html#.UY7GsrXIZPg](http://www.ahrtp.com/RSS-JSfeeds/AF_447_composites_tail_hypercomplexity-6E.html#.UY7GsrXIZPg)>

## 2.2 Provozní porušení materiálu

Pro tvorbu této podkapitoly byla kromě výše uvedené využita literatura [12].

Každý používaný letadlový celek je vystaven konkrétnímu zatížení a podmínkám provozu. Na to je také dimenzován ve fázi návrhu, nicméně z různých důvodů se za provozu objevují vady, které mohou vést k porušení dílu a v nejhorším případě až k letecké katastrofě. Právě to je důvodem použití NDT v údržbě letadel, protože díky tomu lze vývoj poruch zaznamenávat a přistoupit k nápravným opatřením, je-li to potřeba. Dopravní letoun je vystaven extrémním provozním podmínkám. Rozdíl teplot na zemi a v letové hladině dosahuje až 80 °C, tlak v kabině může činit až 60 kPa, přičemž se tyto změny mohou opakovat i v několika cyklech denně. Letoun je dále vystaven atmosférickým vlivům, tj. dešti, sněhu, námraze, poryvům větru, úderům blesku. Každé přistání významně nárazově zatěžuje podvozek a nosnou konstrukci. Obecně jsou zastoupeny následující druhy vnějších vlivů, které způsobují opotřebení letadlových celků:

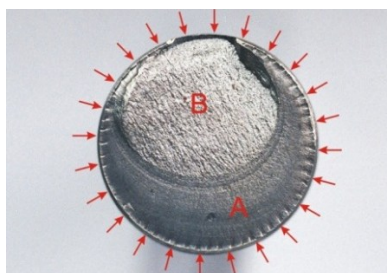
- statické zatížení vlastní vahou a nákladem,
- dynamické zatížení manévry a poryvy, nárazové zatížení při přistání,
- cyklické změny teploty a tlaku,
- chemické působení srážek, chemikálií používaných k ošetření letounu (např. směs proti námraze), působení úderu blesku na strukturu materiálu.

Zmíněné vlivy často ve spojení s vadami popsanými v předchozí podkapitole, jakožto místy iniciace, mohou vést ke vzniku nebezpečných poškození. Níže jsou popsány nejčastější mechanismy provozního porušení materiálu v letectví.

### 2.2.1 Únava materiálu

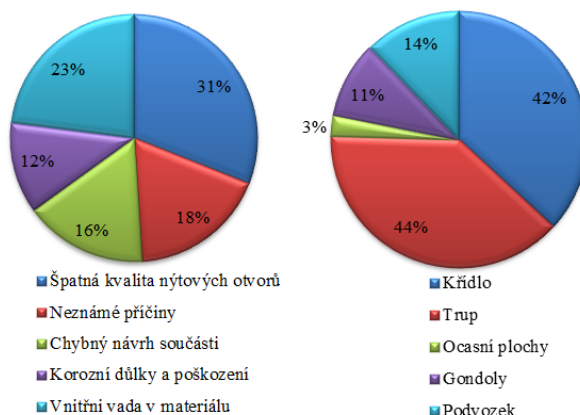
Pojem únavy materiálu je spjat s cyklickým namáháním. Jak již bylo uvedeno, cyklické namáhání letounu jako celku se projevuje především vlivem změn teploty a tlaku. Obecně se únava dělí na nízkocyklovou, kdy je počet cyklů do porušení materiálu nižší než  $10^4$  a vysokocyklovou s větším počtem cyklů, ale nižším zatížením potřebným ke vzniku trhliny. K lomu dochází i přesto, že je zatížení podstatně nižší, než je mez kluzu materiálu. K nukleaci únavových trhlin dochází výhradně na volném povrchu. Příčinou je jednak

nejvyšší hodnota napětí v povrchových vrstvách namáhaného materiálu, jednak drsnost povrchu způsobena mechanickým opracováním, případně korozí. Nerovnosti povrchu vyvolávají při zatěžování lokální koncentraci napětí a tímto podporují vznik lokální plastické deformace. Koncentrátor napětí může vzniknout také v okolí povrchových nebo podpovrchových strukturních nehomogenit. Šíření únavových trhlin lze rozdělit na dvě stádia. V prvním dochází k šíření mikrotrhlin podél skluzových rovin, mikrotrhlíny se dále propojují, ale dosahují převážně hloubky několika desítek mikrometrů. S rostoucí délkou trhlin se směr šíření mění na kolmý na směr působícího napětí, což je okamžik přechodu do druhého stádia, ve kterém se šíří pouze jediná trhlina. Její délka je tím větší, čím menší je amplituda zatěžování. Rozvoj trhliny ve druhém stádiu je podstatně rychlejší než v prvním. Je proto vhodné diagnostikovat vznik této trhliny ještě před přechodem do druhého stádia. Vzhledově jsou únavové trhliny většinou otevřené k povrchu, proto lze použít vizuální či jiné povrchové metody. Na krutem namáhaných součástech je průběh obdobný, na Obr. 2.11 představuje oblast A únavové poškození, oblast B konečné dolomení. Důvody a lokalizace únavových poruch na letadlech jsou patrné z Obr. 2.12.



Obr. 2.11 Typický vzhled únavového lomu hřídele

Zdroj: < <http://znalec.indus3.net/images/pic4-1.htm> >



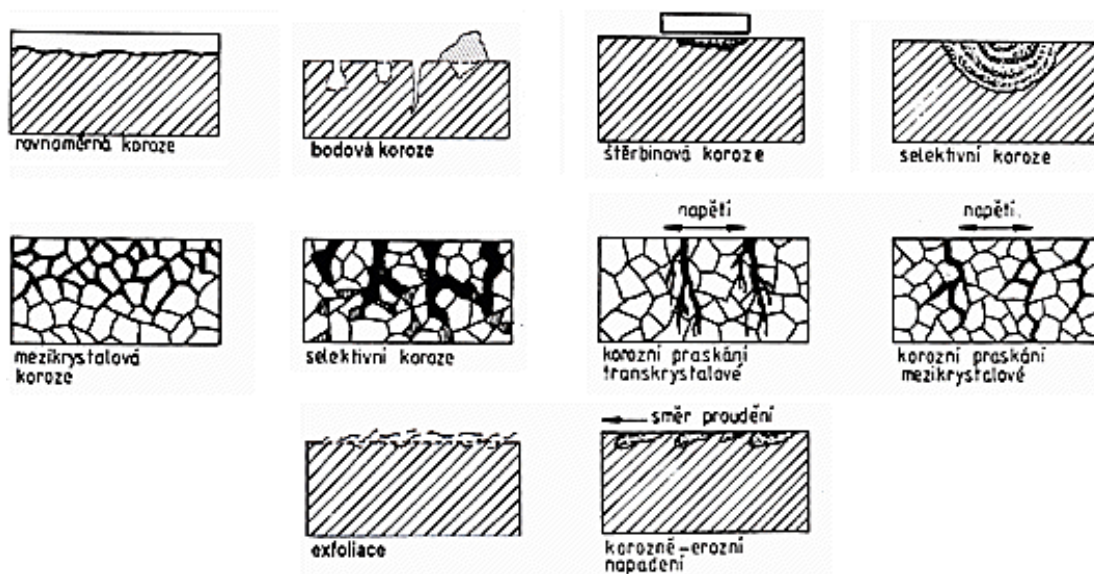
Obr. 2.12 Příčiny (vlevo) a lokalizace (vpravo) únavových poruch na letounech

Zdroj: < <http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/DamageTolerance.ppt> >

### 2.2.2 Koroze

Během provozu jsou části letadla vystaveny chemickým vlivům prostředí a provozních či servisních látek. Ty znehodnocují nejen povrch materiálu, ale také jeho vnitřní strukturu. V konečném důsledku má korozní poškození negativní vliv nejen na pevnostní a plastické vlastnosti, ale také na lomové charakteristiky, stává se místem iniciace trhlin nebo přímo vede k porušení materiálu. Dle vnější formy se koroze dělí na rovnoměrnou, při níž je korozně napaden rovnoměrně celý povrch součástí a nerovnoměrnou, neboli lokální. Lokální koroze má několik forem, např. bodová, důlková, selektivní, nitková. Po jisté době působení korozního média se koroze šíří do struktury materiálu, je to tzv. strukturní koroze a podle způsobu šíření může být mezikrystalová a transkrystalová. Vzhled jednotlivých druhů koroze je zřejmý z Obr. 2.13. Korozní děje probíhají buďto v elektricky nevodivých nebo vodivých prostředích. Jedná se pak o chemickou, resp. elektrochemickou korozi. U chemické koroze dochází pouze k oxidační nebo redukční reakci a v technické praxi je tato výjimkou. Nejčastěji k ní dochází v kapalných plynech, bezvodém alkoholu, bezvodých kyselinách, ale také benzínu nebo petroleji. Podstatně častější je případ elektrochemické koroze, u níž se kromě chemické reakce projevuje depolarizační katodová reakce pomocí přebytečných elektronů vzniklých chemickou reakcí. K tomuto druhu korozního děje stačí i malé množství vody.

Intenzita koroze je vyšší za působení dodatečného mechanického napětí. Šíření trhliny je pak rychlejší a doba do lomu kratší, než kdyby působily oba vlivy odděleně. Jestli je působící napětí proměnlivé v čase, hovoří se o korozní únavě. Při statickém zatížení může docházet ke koroznímu praskání, samotný mechanismus šíření trhliny je však v obou případech stejný a je spojený s porušováním pasivační vrstvy v blízkosti kořene trhliny v důsledku plastické deformace materiálu. To vede k silnějšímu působení korozivního média na strukturu materiálu. Z uvedeného je zřejmé, že je detekce koroze obzvláště důležitá u součástí, které jsou mechanicky zatěžovány. Kontrolu se provádí vizuálně, pomocí vířivých proudů nebo pomocí ultrazvuku, kde v poslední době klíčovou úlohu hraje metoda Phased array.



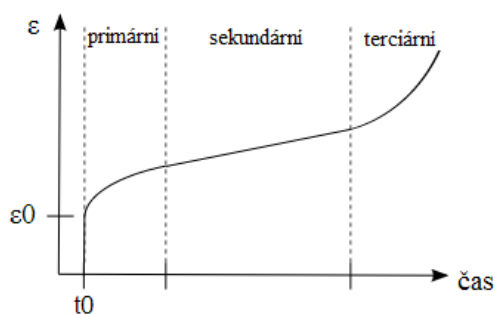
Obr. 2.13 Různé druhy korozí

Zdroj: < [http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni\\_inzenyrstvi\\_se/koroze/uvod.htm](http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni_inzenyrstvi_se/koroze/uvod.htm) >

### 2.2.3 Tečení materiálu

K tečení neboli creepu dochází při působení konstantního napětí nižšího než mez kluzu s přispěním zvýšené teploty. Tečení se klasifikuje podle teploty, při níž probíhá tak, že do 30% teploty tání materiálu se jedná o nízkoteplotní tečení, nad tuto hodnotu až do 90% teploty tání je to tečení vysokoteplotní, přičemž od teploty 50% teploty tání se hovoří o dislokačním tečení, jelikož se realizuje dislokačními mechanismy. Na letadle se může creep vyskytovat především v blízkosti nebo přímo na částech pohonné jednotky a na plochách vystavených aerodynamickému ohřevu, což platí především pro nadzvukové stroje. Nízkoteplotní tečení se vyznačuje tím, že rychlost deformace klesá s časem, až prakticky ustane. Vysokoteplotní tečení má u kovových materiálů tři stádia. První je přechodové (primární) tečení a je podobné nízkoteplotnímu tečení, protože se rychlost deformace sníží až na tzv. minimální rychlost tečení. Dále proces pokračuje stacionárním (sekundárním) tečením, kdy jsou deformační zpevnění a zotavení v přibližné rovnováze, rychlost deformace je tedy přibližně konstantní. Ve třetím stádiu, tedy terciárním creepu, se rychlost deformace zvyšuje a může dojít až k lomu. Rychlost creepu znázorňuje Obr. 2.14. U polymerů se rozlišují pouze dvě stádia, konkrétně stacionární a terciární tečení.





Obr. 2.14 Stádia creepu

Zdroj: < <http://en.wikipedia.org/wiki/File:3StageCreep.svg> >

## 2.2.4 Opotřebenění materiálu

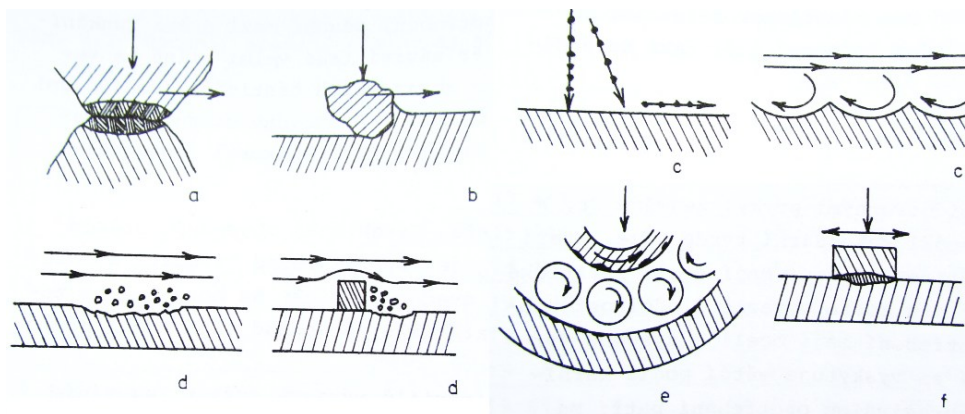
Opotřebenění je typicky provozní degradační proces. Dochází zde k opakovanému působení tlakových, smykových či tahových sil na povrch součástí vyvolaných povrchem jiné součástí nebo plynného, kapalného či pevného média. Mechanismy opotřebenění se dělí na 6 základních typů (schematicky viz Obr. 2.15):

- adheze,
- abraze,
- eroze,
- kavitace,
- vibrační opotřebenění,
- únavové opotřebenění.

Na dopravním letounu jakožto velmi komplexním stroji se lze setkat prakticky se všemi zmíněnými jevy. V největší míře se ale projevují eroze, vibrační a únavové opotřebenění. Díky tomu, že jsou jejich projevy povrchové, je lze zjišťovat vizuálně či povrchovými metodami.

Při erozivním opotřebenění na povrch působí tuhé částice unášené kapalinou nebo plynem. Velikost otěru je dána především dopadající rychlostí částic, jejich hmotností a úhlem dopadu. Právě podle předpokládaného úhlu dopadu se volí materiál, který by měl být při malých úhlech tvrdý, při velkých spíše měkký. K vibračnímu opotřebenění dochází u součástí, které konají vzájemný tangenciální pohyb při působení normálových zatížení. Rozsah opotřebenění ovlivňují nejvíce amplituda, frekvence a měrný tlak při vibraci,

nezanedbatelný vliv má také dvojice materiálů, které by měly být odolné proti abrazi (tedy opotřebení smykovým třením materiálové dvojice) a oxidaci. Únavové opotřebení neboli kontaktní únava vzniká při opakovaném stykovém namáhání u valivého pohybu. Typickým projevem je zde pitting, tj. tvorba povrchových důlků. Pro předcházení tohoto jevu by měl být materiál zpevněn, je třeba dbát i na čistotu struktury, jelikož se vměstky stávají koncentrátory napětí a jsou místem iniciace mikrotrhlin.



Obr. 2.15 Schéma základních mechanismů opotřebení [3]:

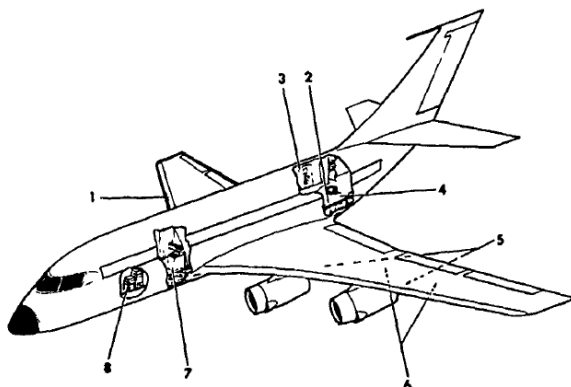
*a – adhezivní; b – abrazivní; c – erozivní; d – kavitační; e – únavové; f – vibrační*

## 2.3 Typická poškození částí letadla

Pro tvorbu této podkapitoly byla kromě výše uvedené využita literatura [17].

Poškození na dopravním letounu jsou dána charakterem jeho provozu, který lze označit za náročný. Všechny již zmíněné mechanismy poškození mají vliv na letadlové celky, avšak některé z nich jsou příznačné právě pro letecký provoz. Části letadla jsou napadány korozí. Velmi nebezpečná je pokročilá koroze potahu vyrobeného z hliníkových slitin, které jsou náchylnější na vznik koroze než čistý hliník. Dále korodují také ocelové a titanové díly. Nejčastějšími místy výskytu koroze na povrchu jsou kýlová plocha, spodní část trupu, oblasti kolem dveří, centroplán, spojení trupu a stabilizátorů nebo trupu s křídly, pylony pro uchycení pohonných jednotek, křídlo poblíž trysky motoru, prostory mezi klapkami, křídélky a křídlem (viz Obr. 2.16). Také systémy letounu a interiér jsou vystaveny korozivním vlivům, jedná se především o oblasti pod kuchyněmi a toaletami, drážky uchycující křesla cestujících, odmrazovací systémy, lanka a táhla řízení a vnitřní stěny palivových nádrží, na které působí voda a bakterie přítomné v pohonných hmotách.

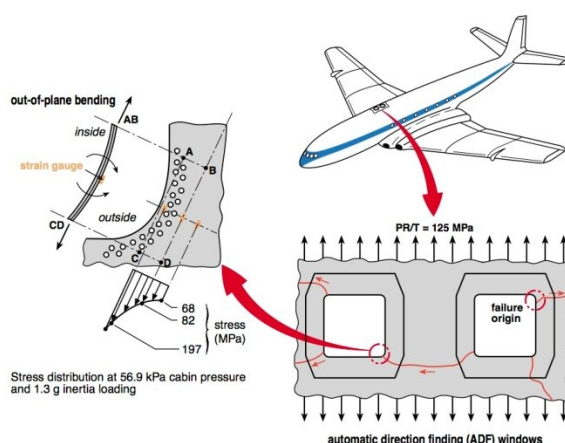
Zvláštní problém je koroze a jiné poškození voštinových kompozitů, které budou zmíněny v další části této práce.



Obr. 2.16 Místa nejčastějšího výskytu koroze na letounu: 1 – povrch pod odmrazovacím systémem; 2 – konstrukce podlahy a podlaha; 3 – nástupové dveře; 4 – oblast kuchyní; 5 – prostory u trysek motoru; 6 – palivové nádrže; 7 – prostory u toalet; 8 – prostory u akumulátorů

Zdroj: <<http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA160638>>

Únava materiálu vedla v minulosti k mnoha leteckým nehodám, které pomohly ve velké míře pochopit tento jev. První proudový dopravní letoun na světě De Havilland Comet britské společnosti BOAC utrpěl katastrofu v roce 1954 po tom, co se ve velké výšce rozpadl na kusy z důvodu únavové trhliny, která byla iniciována ostrým rohem okénka v kabině cestujících (Obr. 2.17). Od té doby se výrobci přiklánějí spíše k používání zaoblených rohů oken.



Obr. 2.17 Ukázka únavového poškození na letounu Comet v roce 1954

Zdroj: <<http://fugahumana.files.wordpress.com/2012/06/window-2.jpg>>

Chybná oprava v roce 1980 vedla k propagaci únavového lomu na zádi letounu Boeing 747 společnosti China Airlines, stroj se 22 let poté zřítil do Tchajwanského průlivu. Podobný důvod měla i nehoda Boeingu 737 společnosti Aloha Airlines, která se udala v roce 1988. Její jedinou obětí se stala palubní průvodčí, což lze považovat za výjimečné štěstí vzhledem k obrovskému poškození horní části potahu za pilotní kabinou (Obr. 2.18). Jako příčina byla uvedena únava materiálu spojená s korozí urychlenou působením slané mořské vody. Únava se v minulosti podepsala i na závadách pohonných jednotek. Dvě fatální katastrofy letounů Il-62 polských aerolinek LOT v letech 1980 a 1987 byly způsobeny únavovým lomem hřídele motoru v blízkosti turbíny spojeným s tepelným namáháním ložisek daným konstrukční vadou.



*Obr. 2.18 Boeing 737 letu 243 Aloha Airlines v roce 1988*

*Zdroj: <<http://www.aviationchatter.com/2009/07/cabin-depressurization-structural-failure-a-pilots-perspective/b737-200-aloha-hawaii/>>*

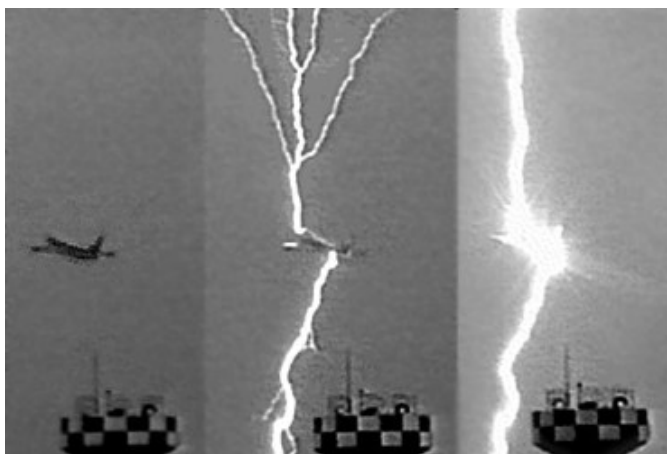
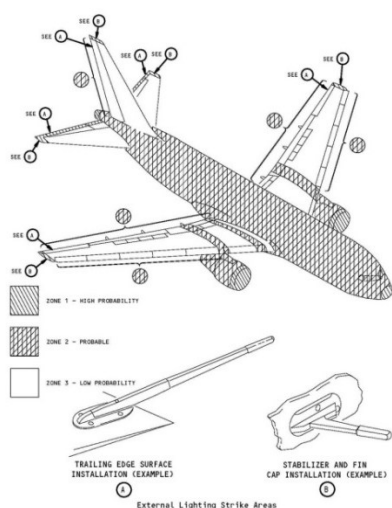
V ocelových a titanových dílech se vyskytuje vodíková křehkost, při níž jsou zhoršeny plastické a pevnostní vlastnosti. Vodík může být zaváděn během výroby, galvanizace a při korozi s vodíkovou nebo smíšenou depolarizací a během mytí. Především u vysokopevnostní ocele hrozí praskání iniciované vměstky a mikrotrhlinami. Na povrchu mnoha letadlových celků je zřetelný vliv opotřebení, např. eroze nejvíce postihuje vnitřní klapky, které jsou vystaveny úderům zrn písku a šterku od podvozkových kol, přídě a náběžné hrany nosných a řídicích ploch mohou být poškozeny po průletu krupobitím nebo hejnem ptáků (Obr. 2.19). Taková událost může být velmi nebezpečná pro proudové motory, jejichž vysokotlaká část není schopna odolávat silnějším nárazům cizích těles. Vedle této příčiny sužují pohonné jednotky nejvíce teplotní a únavové namáhání.



Obr. 2.19 Střet s ptáky jako jedna z častých příčin poškození potahu a motorů dopravního letounu

Zdroj: <<http://afkra.blogspot.cz/2012/06/birdstrike.html>>

Byť se letoun chová jako Faradayova klec, po úderu blesku (Obr. 2.20) občas dochází vlivem vysokých teplot okolního vzduchu, jenž je ve formě plazmatu, k natavení materiálu v místě vstupu a výstupu blesku (Obr. 2.21) a tedy i ke strukturním změnám, které je třeba vyšetřit.



Obr. 2.20 Zóny pravděpodobnosti úderu blesku na letounu Boeing 737 a průběh úderu

Zdroj: <<http://blogs.crikey.com.au/planetalking/2010/08/17/lightning-related-crash-raises-787-issue/>>



Obr. 2.21 Svislý stabilizátor po zasažení bleskem

Zdroj: <[http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2012\\_q4/4/](http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2012_q4/4/)>



### **3 BĚŽNÉ METODY NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ V LETECTVÍ**

Pro tvorbu této kapitoly byla využita literatura [1], [2], [7], [8].

V letectví se využívá několik nedestruktivních metod technické diagnostiky. Obecně lze říci, že neexistuje jedna metoda, která by splnila všechny požadavky pro kontrolu všech dílů, proto je nutno použít vždy tu metodu, která je nejvíce vyhovující, případně aplikovat kombinaci metod, což je případ kritických konstrukčních prvků, tedy takových, jejichž porucha způsobí katastrofické selhání letounu. Metody se z hlediska použitelnosti dělí na povrchové a objemové. K povrchovým metodám patří:

- vizuální metody,
- kapilární metody,
- metoda rozptylových toků,
- metoda vířivých proudů.

Objemové metody jsou:

- zkoušky ultrazvukem,
- prozařování.

Povrchové metody jsou schopny detekce necelistvostí na povrchu, tedy i takových, které mají svůj počátek na povrchu a sahají hlouběji do struktury materiálu. U vizuálních a kapilárních metod je podmínkou, aby byla vada otevřena na povrchu, metodami rozptylových toků a vířivých proudů lze s jistými omezeními zjišťovat také vady, které mají svůj počátek v hloubce několika milimetrů. Při předpokladu výskytu hlouběji umístěných vad je nutno použít některou z objemových metod, které jsou v jistém rozsahu zaměnitelné, avšak existují případy, kdy lze aplikovat pouze jednu z nich. Mimo popsanou klasifikaci je možno zařadit akustické metody, holografii a shearografii. Tyto metody se soustřeďují na větší celky, jsou méně časté a převážně se ve výčtu nedestruktivních metod technické diagnostiky neuvádějí.

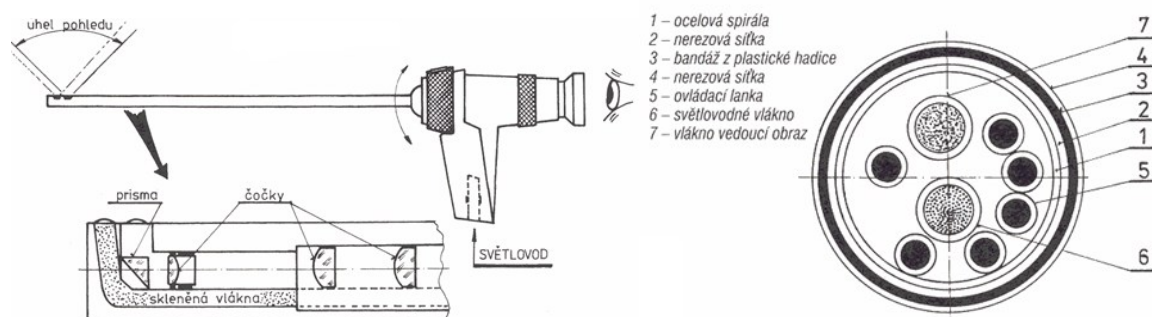
### 3.1 Vizuální metody

Pro tvorbu této podkapitoly byla kromě výše uvedené využita literatura [10].

Zrak je pro člověka nejdůležitějším smyslem ke vnímání informací z okolního světa. V podstatě všechny nedestruktivní metody technické diagnostiky jsou v konečné fázi vyhodnocovány pomocí zraku, avšak vizuální metody přímo využívají viditelné spektrum elektromagnetického záření (Obr. 4.5) pro povrchovou kontrolu materiálu. Limitujícím faktorem pro tyto metody je velikost vad, které lze odhalit. Minimální hloubka trhliny, která je detekovatelná se pohybuje okolo 0,1 mm s šířkou 0,01 mm (byť lze ve velmi příznivých podmínkách detekovat vady i 0,0005 mm široké) a délkou 0,1 mm. Podle způsobu provádění kontroly se vizuální metody dělí na:

- přímé, u nichž není přerušena optická dráha světla a
- nepřímé, které využívají přístroje s optickými vlákny nebo videozáznamy a fotografii.

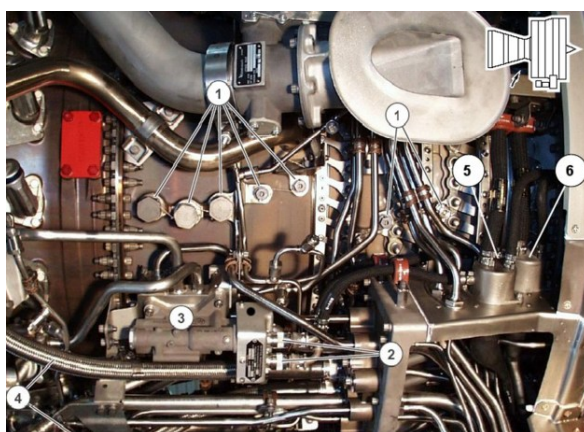
Mezi přímé metody patří také všeobecná kontrola prováděná pouhým zrakem ze vzdálenosti alespoň 600 mm při minimální intenzitě osvětlení 160 luxů, ta se provádí především pro přípravu objektu k použití dalších nedestruktivních metod. Naopak místní kontrola, o které se hovoří při vzdálenostech menších než zmíněných 600 mm, umožňuje získat lepší poznatky o stavu povrchu často s použitím dodatečných nástrojů. Nejjednoduššími pomůckami jsou lupy a zrcátka, které umožňují vizuální kontrolu obtížněji dostupných míst. Optimální podmínky pro pozorování jsou úhel dopadu světla vzhledem k normále mezi 45° a 85° a pozorovací úhel alespoň 30° vzhledem k pozorovanému povrchu. Zkoušky se provádějí za bílého přirozeného nebo umělého osvětlení nebo také ultrafialového záření. Pro kontrolu nejhůře dostupných dílů se používá technických endoskopů, které jsou v provedení s pevnou trubicí (boroskopy) nebo v poslední době častěji s ohebnou hadicí (fibroskopy), konstrukční provedení obou přístrojů je zřejmé z Obr. 3.1. Jestliže je přístroj schopen pořizovat videozáznam a přenos obrazu se koná elektronickou cestou namísto optické, lze hovořit o videoskopu. Všechny přístroje obsahují zdroj umělého světla.



Obr. 3.1 Schéma boroskopu (vlevo) a řez ohebou části fibroskopu (vpravo)

Zdroj: Výukové materiály společnosti Job Air

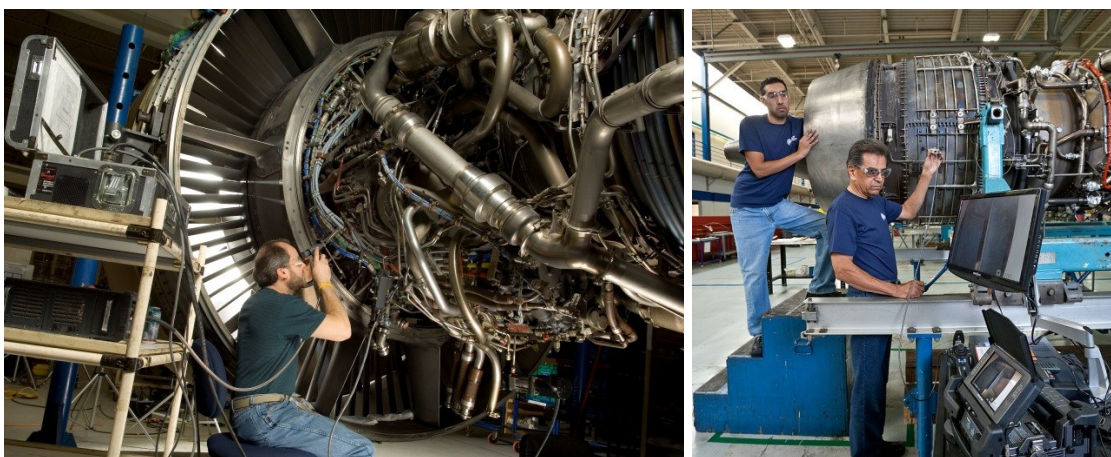
Boroskopy jsou vybaveny soustavou čoček v jednoduché přímé trubici. Lze u nich použít rozličné druhy objektivů s různými pozorovacími úhly, některé sondy jsou schopny pracovat i ve vodním nebo olejovém prostředí. V optických soustavách boroskopů jsou umísťovány stupnice pro určení velikosti nalezených vad, většinou lze také pořizovat snímky připojením fotoaparátu k okuláru. V některých případech nelze zajistit přístup trubice na požadované místo, z toho důvodů se používá fibroskopů, které kromě toho, že zajišťují přístup k pozorovanému místu díky použití hadice, obsahují systém dálkového ovládání koncovky s objektivem, díky čemuž si lze velmi dobře toto místo prohlédnout. Pro práci v chemicky agresivním prostředí jsou sondy vybaveny korozivzdorným pouzdem a jsou impregnovány teflonem. Na dopravním letounu je nejčastějším místem použití endoskopů pracovní část pohonné jednotky. Motor je vybaven speciálními inspekčními otvory určenými k provádění inspekcí, které jsou během provozu uzavřeny zásepky (viz Obr. 3.2).



Obr. 3.2 Boroskopické zátka v turbínové části motoru CFM-56-5

Zdroj: Výukové materiály společnosti Job Air

Provádějí se prohlídky vzducho-plynového traktu motoru, takže jednotlivých stupňů kompresoru a horkých částí motoru, tedy spalovací komory, turbíny, výtokové trysky a lopatek posledního stupně turbíny na trhliny a známky přehřátí či propálení (Obr. 3.3). Během boroskopické prohlídky rotoru kompresoru a turbíny se postupně ručně otáčí jednotlivými částmi tak, aby bylo možné zkontrolovat všechny lopatky. Dnes se již běžně ukládají celé videozáznamy z inspekcí, pak lze nalezené problémy konzultovat přímo s výrobcem bez nutnosti pořizování jednotlivých snímků. Kontroly jsou prováděny periodicky po určité době či náletu podle požadavků výrobce, nebo když dojde k nasání cizích předmětů z plochy letiště nebo ptáků během startu.



*Obr. 3.3 Kontrola leteckého motoru boroskopem (vlevo) a videoskopem (vpravo)*

*Zdroj: < <http://www.kellyaviationcenter.com/kac/index.cfm/services/> > a < <http://www.pw.utc.com> >*

Vizuálně se kontroluje potah trupu, hlavně ta místa, která jsou vystavena nárazům ptáků a kamenů, dále se prohlíží hydraulické systémy, např. směrového kormidla, důležitá je kontrola kompozitních struktur, jako jsou kormidla, štíty, kryty radarů a podlaha. Zvláštní místo mezi těmito zkouškami zaujímá měření hloubky rýh na okénkách. K tomu účelu se používá speciálních zařízení, pomocí kterých se zaostřuje nejprve na plochu okénka, dále pak na dno rýhy. Ze stupnice umístěné na fokusačním kroužku lze odečíst hloubku rýhy a podle návodu ponechat díl v provozu nebo provést výměnu. Průběh měření je zaznamenán na Obr. 3.4.



*Obr. 3.4 Měření hloubky rýh na okénku*

### 3.2 Kapilární metody

Jako kapilární či penetrační metody se označuje zkoušení povrchu materiálu s využitím charakteristických vlastností fázových rozhraní známých pod pojmem kapilární jevy. Pro zkoušky se používají kapaliny zvané penetranty a lze je aplikovat na širokou škálu materiálů používaných v letectví. Jedná se o technicky i finančně nenáročnou a přiměřeně rychlou metodu. Kapilární metody se dělí na:

- metodu barevné indikace, u které se přítomnost necelistvosti projeví kontrastní barevnou indikací hodnocenou v denním nebo umělém bílém světle,
- metodu fluorescenční, u níž necelistvost světélkuje v ultrafialovém záření,
- metodu dvojúčelovou, u níž se necelistvost může projevit oběma výše zmíněnými způsoby v závislosti na použitém osvětlení.

Každá kapilární zkouška má obdobný průběh. Nejprve je třeba zkoumaný povrch očistit a připravit, k čemuž je nejlepší použít chemické prostředky, např. organická rozpouštědla. Dále se na povrch nanáší penetrant a to buď nátěrem či nástřikem nebo ponořením do penetrační lázně, je-li to možné. V této fázi musí penetrant proniknout do povrchových trhlin, z tohoto důvodu se nechá delší dobu působit, nejčastěji se tato doba pohybuje mezi 5 a 20 minut. Pro urychlení penetrace lze povrch či penetrant ohřát nebo snížit atmosférický tlak v okolí, vstup penetrantu do necelistvostí může usnadňovat také působení vibrací. Dalším krokem je odstranění nadbytečného penetrantu tak, aby při vyhodnocování nedocházelo k falešným indikacím, ale přitom nesmí být odstraněna kapalina z necelistvostí. K tomuto účelu se nejčastěji používají emulgátory, které reagují s penetrantem a usnadňují jeho odstranění z povrchu oplachem vodou. V některých



případech se používá rozpouštědel, avšak zde existuje velká pravděpodobnost vypláchnutí detekční kapaliny z vad. Pro tvarově jednodušší součástí se může nadbytek penetrantu odstranit mechanicky, např. ubrouskem. Dále je potřeba objekt osušit, což se realizuje buďto přirozenou cirkulací vzduchu nebo nuceně pomocí sálání teplého vzduchu či proudem vzduchu. Pro odlišení indikace vady od pozadí se pak na součást nanáší vývojka, která je v pevném skupenství. Proces vyvolávání může být suchý nebo mokrá dle toho, zda je vývojka rozptýlena v plynu (např. vzduchu) nebo kapalině (vodě či těkavých rozpouštědlech). Následujícím krokem je vyhodnocení a dokumentace indikací. Nakonec je potřeba díl očistit mechanicky, vodou, rozpouštědly nebo odmašťovači podle chemického složení použitého kapilárního souboru (Obr. 3.5).



*Obr. 3.5 Kapilární soubor ve spreji*

*Zdroj: <<http://www.aerochemisb-cheongfy.com/2010/09/ambersil-leak-flaw-detection-sprays.html>>*

Vyhodnocení se provádí v bílém světle nebo v ultrafialovém záření v závislosti na aplikované metodě. Zde nejvíce záleží na zkušenostech a pečlivosti pracovníka. Objekt se prohlíží vždy dvakrát pouhým okem, případně pomocí lupy. První pozorování se koná bezprostředně po nanesení vývojky, kdy je patrná pouze indikace největších vad, jejich kresba už poté není tak zřetelná. Podruhé se k pozorování přistupuje po uplynutí cca 15 minut a tím lze zachytit jemné necelistvosti, které potřebují delší dobu na vztlínání penetrantu. Podle vzhledu se indikace necelistvostí dělí na:

- souvislé liniové indikace,
- přerušované liniové indikace,
- okrouhlé indikace,
- tečkovité indikace,



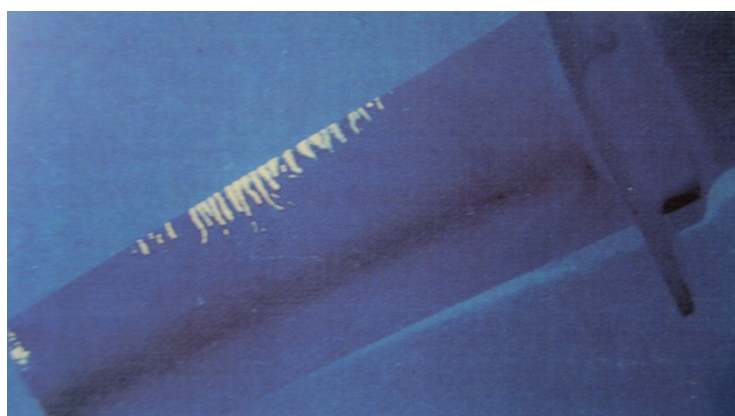
- rozptýlené indikace.

Pro zvýšení objektivnosti vyhodnocení lze indikace jednotlivých vad u konkrétních detekčních prostředků zjistit pomocí kapilárních měrek s umělou nebo přirozenou nečelivostí (Obr. 3.6). Jelikož jsou u nich známy rozměry a charakter vad, je pak možné určit, jaké nečelivostí se nacházejí na zkoumaném objektu. Při nedodržení pracovního postupu nebo čistoty pracovního místa může dojít ke vzniku falešných indikací, proto je vhodné opakovat zkoušku, případně použít jinou defektoskopickou metodu, existuje-li podezření, že k takovému incidentu došlo.



*Obr. 3.6 Měrka s umělými vadami (vlevo) a během zkoušení v ultrafialovém záření (vpravo)*

Pro letectví je největší výhoda kapilárních metod v jejich použitelnosti na vodivé i nevodivé materiály. Proto se používají např. na kompozitní materiály (kromě pórovitých). Zkoušky se provádí buďto přímo na letounu nebo pro menší letadlové celky v laboratořích k tomu určených. Takto se kontroluje rotory turbín (Obr. 3.7), disky podvozkových kol, podvozkové nohy a jiné části podvozku, závěsy křídel nebo potah sendvičových struktur.



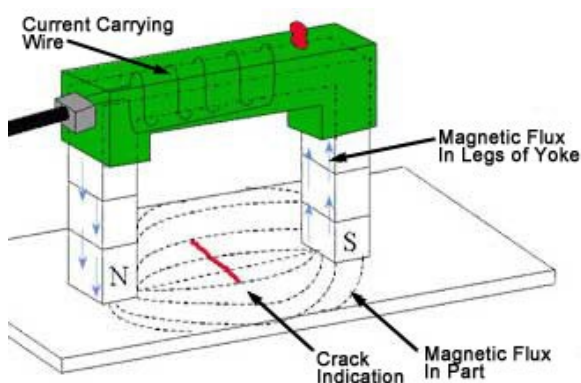
*Obr. 3.7 Indikace na lopatce turbíny leteckého motoru [2]*

### 3.3 Metoda rozptylových toků

Pro použití metody rozptylových toků musí být zkoušený materiál ferromagnetický. Právě z toho důvodu je její aplikace v letectví omezena, přesto lze najít součásti, pro které ji lze úspěšně využít, proto si našla místo ve zkušebnách leteckých údržbových organizací. Základním předpokladem pro zkoušení metodou rozptylových toků je magnetizace zkoumané oblasti. Lze ji dosáhnout několika způsoby, jsou to:

- pólová magnetizace cívkou,
- pólová magnetizace pomocí magnetického jha,
- cirkulární magnetizace přímým průchodem proudu kontrolovaným objektem,
- cirkulární magnetizace pomocným vodičem,
- cirkulární magnetizace indukcí proudu,
- kombinovaná magnetizace,
- magnetizace metodou Quick Break.

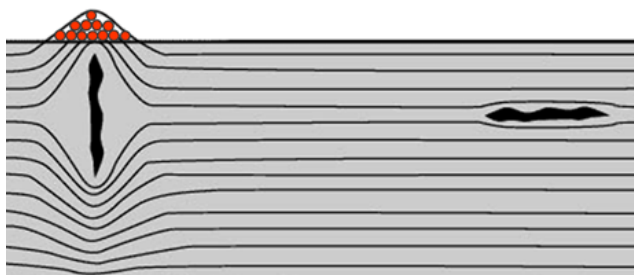
Pro pólovou magnetizaci je příznačná přítomnost magnetických pólů, objekt má po zmagnetování vlastní magnetické pole. U cirkulární magnetizace nevznikají magnetické póly a navenek se magnetizace nijak neprojevuje, byť je součást stále zmagnetována. Výhodou kombinované magnetizace je, že lze jedinou pracovní operací zjistit ve výrobku necelistvosti libovolné orientace. V jiném případě je třeba provádět dvě zkoušky pro podélné a příčné trhliny. U této metody se díl magnetuje současně dvěma na sebe kolmými magnetickými poli dle výše uvedených způsobů, navíc se výsledný vektor pole musí prostorově kývat nebo rotovat, proto se používá zvláštní magnetizační zařízení. U metody Quick Break lze dosáhnout zmagnetování větších ploch pomocí rychlého vypnutí magnetizačního proudu. Po dokončení vyhodnocení indikací je třeba zkoušený díl odmagnetovat. Fyzikální podstatou metody rozptylových toků je rozdílná intenzita magnetického pole v neporušených místech materiálu a v oblastech výskytu necelistvostí. Po zmagnetování objektu vzniká nad těmito oblastmi magnetický rozptylový tok. Obecný princip metody a její použití zobrazuje Obr. 3.8.



Obr. 3.8 Princip metody (vlevo) a použití metody na potrubí (vpravo)

Zdroj: <<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/Magnetization.htm>> a  
<[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Wet\\_magnetic\\_particle\\_testing\\_on\\_a\\_pipeline.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Wet_magnetic_particle_testing_on_a_pipeline.jpg)>

Indikace je možná pomocí magnetického prášku, pak se jedná o magnetickou metodu práškovou, nebo pomocí vhodných sond a je nejzřetelnější, jestliže jsou trhliny orientovány kolmo na směr magnetování (Obr. 3.9). Ferromagnetické prášky pro indikaci mohou být barevné (černé, šedé či červenohnědé) nebo fluorescenční, tzn. světélkující v ultrafialovém záření. Lze se setkat jak s použitím suchých prášků, tak olejových nebo vodních suspenzí, případně se používá i polymerové systémy, které po indikaci tvrdnou a jsou uchovávány jako dokumentace vady. Především při automatizované kontrole jsou namísto prášků používány detekční sondy, např. vzduchová cívka, ferromagnetická sonda nebo v současnosti nejpoužívanější Hallova sonda, která je na rozdíl od dvou předchozích sond postavena na polovodičových komponentech.



Obr. 3.9 Vliv nečelistvostí na průběh magnetického toku v objektu a jejich detekci

Zdroj:< <http://www.iprt.iastate.edu/assistance/nde/tools/magparticle>>

Metoda rozptylových toků se v letectví používá v místech s dobrým přístupem (Obr. 3.10). Typickými částmi, na které je aplikována jsou komponenty podvozku, táhla řízení, kritické nosné prvky, mechanismy pohybových šroubů, dále kování, čepy a šrouby.

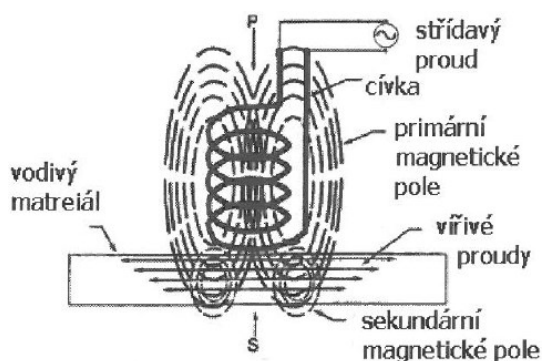


Obr. 3.10 Vady na hřídeli unášeče vrtule

Zdroj: <<http://aviationengines.com.au/ndt.html>>

### 3.4 Metoda vířivých proudů

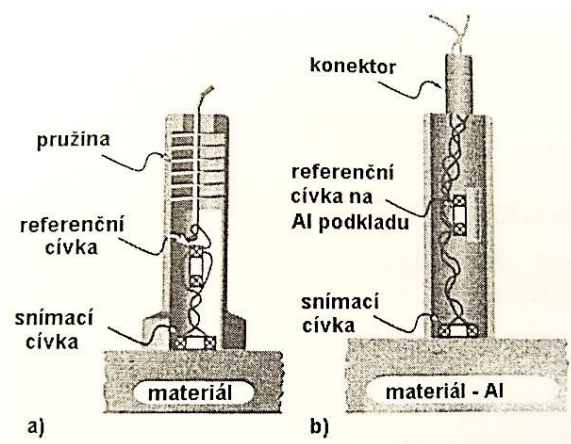
Metoda vířivých neboli Foucaultových proudů je založena na základních elektromagnetických jevech, se kterými se lze setkat ve vodivých materiálech. Princip vychází z indukce elektrického napětí v časově proměnném magnetickém poli. Indukce probíhá v rovinách kolmých na vektor magnetické indukce a vzniklé proudy tvarem připomínají vodní vír. Magnetické pole, které je efektem přítomnosti těchto proudů, ovlivňuje původní budící magnetické pole (Obr. 3.11). Výsledné magnetické pole, vektorově složené z obou zmíněných, indukuje napětí v měřicím vinutí snímače. Jestliže se na povrchu materiálu nebo v malé hloubce uvnitř materiálu nachází necelistvost, změní se jeho elektrické a magnetické vlastnosti, což lze touto metodou sledovat.



Obr. 3.11 Vznik vířivých proudů [7]

Velikost vířivých proudů je závislá na druhu materiálu, tvaru objektu a frekvenci budícího proudu. Při vyšší frekvenci je dosah větší. Přesto nelze zjišťovat vady ve větší hloubce, neboť dochází k povrchovému jevu, tj. toku proudu pouze po povrchu tělesa. Dalším omezením je okrajový jev, při němž je koncentrace magnetického pole u hrany tělesa větší, takže zde není možné metodu použít. Taktéž je problém s kontrolou menších objektů. Pro letectví má ovšem metoda mnoho výhod, jako je poměrně nízká nákladnost či bezkontaktnost, má tedy v tomto oboru velmi důležité místo.

Snímače pro zkoušení vířivými proudy jsou dvojího provedení: s průchozí cívkou a s příložnou cívkou. Metoda zkoušení s průchozí cívkou se používá pro tyče, trubky a jiné díly s kruhovým průřezem, proto se v provozních měřeních na letecké technice neuplatňuje. Pro příložnou cívku se hranice zjištělnosti vady uvnitř materiálu pohybuje kolem 5 mm, což je pro aplikaci v letectví naprosto dostačující. Čím menší průměr má snímač, tím menší necelistvosti je schopen detekovat, ovšem za cenu snížení hloubkového dosahu. Nejlépe zjištělné vady jsou ty, které mají podstatně větší délku, než je pole vířivých proudů. Minimální délka pro nález je asi 0,4 mm při hloubce 0,1 mm a šířce v řádu desetin mikrometru. Z konstrukčního hlediska mohou být snímače absolutní nebo diferenční. U absolutního snímače se používá pouze jedno vinutí, zařízení je tedy jednodušší, avšak přesnější údaje lze získat z diferenčního snímače, který obsahuje dvě cívky. Snímače mohou být vzduchové, kdy se snímač přikládá přímo na zkoušený materiál nebo s podkladem ze stejného materiálu, jaký je předmětem zkoušení (Obr. 3.12). Vstupní signál je sinusoidálního nebo impulzního charakteru, přičemž převažuje první ze zmíněných s jednofrekvenčními nebo vícefrekvenčními generátory.



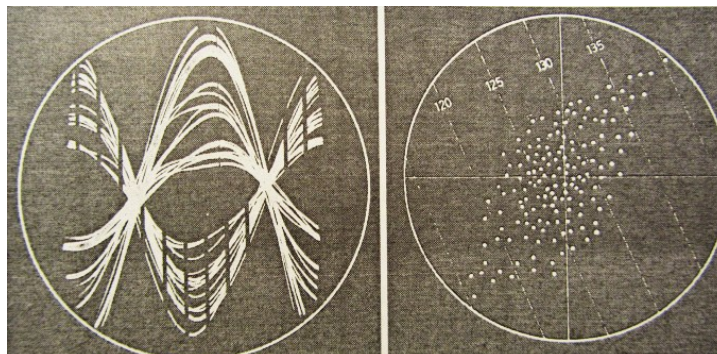
Obr. 3.12 Příložné diferenční snímače [1]: a) – vzduchová; b) – s hliníkovým podkladem



Frekvence budícího obvodu jsou v rozsahu 3 Hz až 120 MHz, přičemž se nejvíce uplatňují frekvence mezi 1 kHz a 5 MHz. Volbou pracovní frekvence se ovlivňuje zjištělnost vad a zajišťuje se správný odstup signálu vzniklého z necelistvosti od šumu. Volba je často ovlivněna zkoušeným materiálem a velikostí součástí. Frekvence je také omezena konstrukcí snímače, jelikož je každý určen pro daný frekvenční rozsah. Pro zobrazení měřených veličin se používá dvou způsobů:

- časově lineární zobrazení (rychlé nebo pomalé),
- bodové zobrazení (neboli vektorové).

U časově lineárního zobrazení se paprsek neustále konstantní rychlostí vychyluje do stran, ve svislém směru je výchylka daná naměřeným napětím. Pro rychlé zobrazení se vodorovná výchylka volí podle frekvence, při pomalém zobrazení je dána velikostí součástí, což se uplatňuje pro automatické linky nepoužívané v letectví. U vektorového zobrazení je plocha vyobrazením impedanční roviny. Vzdálenost bodu, který představuje koncový bod vektoru, od středu obrazovky je určena napětím, úhlové umístění bodu fázovým posunem. Jednotlivá zobrazení jsou na Obr. 3.13.



Obr. 3.13 Časově lineární (vlevo) a vektorové (vpravo) zobrazení [1]

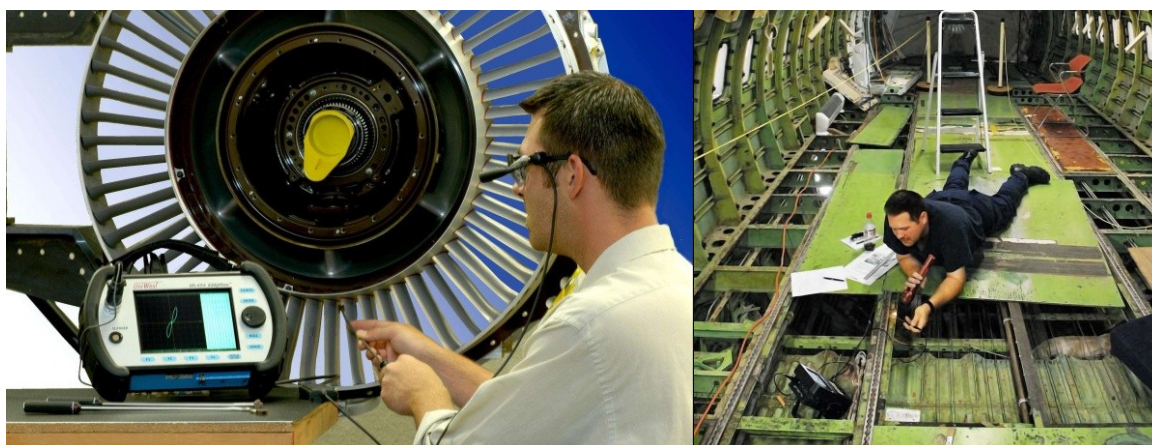
Vzhled indikace vady na obrazovce je kromě samotné necelistvosti dán zvolenou frekvencí, materiálem, typem použité sondy a geometrickými parametry součástí. Obecně se hloubka trhliny určí pomocí fázového posunu, pro přesnější odhad parametrů vady jsou používány měřky vyrobené z materiálu totožného se zkoušeným s přesným popisem umělých vad (Obr. 3.14). V současnosti se lze v letectví setkat prakticky pouze s digitalizovanými zařízeními pro zkoušení vířivými proudy, díky čemuž je možno záznamy ukládat pro další vyhodnocení.





*Obr. 3.14 Sonda pro zkoušení otvorů a měrka s umělými vadami*

Aplikace metody vířivých proudů v údržbě letadel je velmi široká. Je to nejčastější metoda zkoušení potahu letounu, který je ve velké míře vyroben z hliníkových slitin. Provádí se měření na rotorových listech a nosných celcích (Obr. 3.15). Dále se měří vodivost, nýtové a šroubové spoje, nízkofrekvenčně se zkouší vícevrstvé nýtové spoje. Rotačními sondami se zkouší otvory závěsů a kování, klappek, motoru a pylonů. Odhalit lze také korozi v typických místech, např. v oblastech překlátování potahových plechů. Pro zkoušení vícevrstvných oblastí na draku a nýtových spojů, se používá tzv. vzdálené pole vířivých proudů, kdy jsou budící a snímací cívka umístěny v jisté vzdálenosti od sebe.



*Obr. 3.15 Použití metody na listech dmychadla (vlevo) a nosném rámu podlahy (vpravo)*

Zdroj: <<http://news.thomasnet.com/news/test-measuring-instruments/meters/electric-meters/eddy-current-meters>> a <<https://share.sandia.gov/news/resources/releases/2007/inspection.html>>

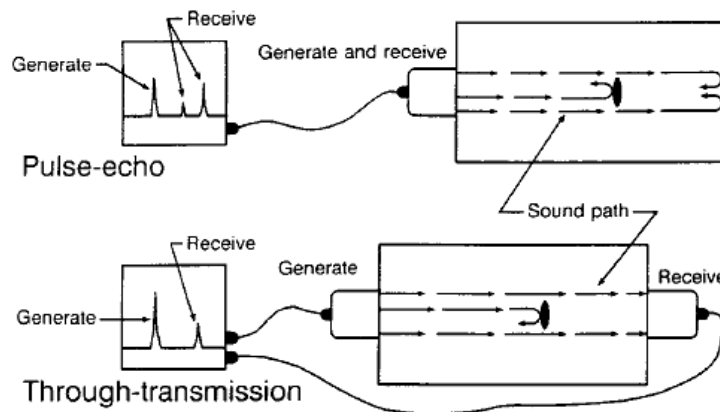
### 3.5 Zkoušky ultrazvukem

Pro tvorbu této podkapitoly byla kromě výše uvedené využita literatura [9].

Ultrazvuk je typ vlnění s frekvencí vyšší, než je člověkem slyšitelný zvuk. Jako jeho spodní hranici se udává 20 kHz. Nejčastěji používané frekvence pro ultrazvukové metody jsou v rozmezí 0,5 MHz až 15 MHz. V principu je zkoušení ultrazvukem zavádění do objektu ultrazvukového vlnění a detekce signálů (impulzů) od vln, které pronikly skrz objekt. Tyto signály obsahují informace o případných necelistvostech, jelikož vznikají také odrazem od jejich stěn. Jedná se především o amplitudu, fázi, spektrum a obálku signálu, která se získá během přemísťování sondy podél nebo kolem necelistvosti. Principiálně se rozlišuje dva druhy zkoušení ultrazvukem, jsou to:

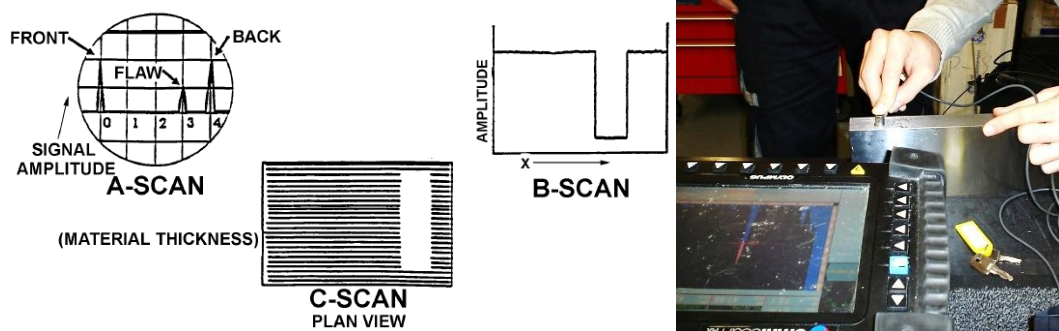
- metoda průchodová,
- metoda odrazová.

První ze zmíněných vyžaduje použití dvou sond, z nichž je jedna vysílací a druhá přijímací a jsou umístěny na obou stranách zkoušeného dílu. Právě požadavek přístupu z obou stran je nejvíce omezující pro tuto metodu. Odrazová metoda využívá odrazu vln od protilehlé stěny součásti, proto je obecně použitelnější. Její nevýhodou je dvojnásobná dráha, kterou musí vlnění urazit, proto zde dochází ke zřetelnějšímu oslabení signálu a vady jsou tedy obtížněji detekovatelné. Rozdíly v metodách a detekce vad jsou viditelné na Obr. 3.16. Sondy se rozlišuje v závislosti na používané poloze vzhledem ke zkoušené oblasti na přímé a úhlové, dále pak dle druhu ultrazvukových vln na sondy podélných a příčných vln. Nejmenší podpovrchové vady, které lze ultrazvukovou metodou odhalit mají šířku 10  $\mu\text{m}$  a délku nebo průměr 0,7 mm, pro povrchové trhliny je minimální hloubka 0,1 mm, tj. rozměrů stejných nebo větších než je délka použité vlny, jež je v izotropním prostředí nepřímo úměrná použité frekvenci. Ultrazvukové metody jsou metody kontaktní a při zkouškách je tedy nezbytné použití vazebního prostředku. Tím může být například voda, avšak běžně není používána kvůli korozivnímu působení, případně se do ní přidává antikorozivní aditiva. Dále jsou používány prostředky na alkoholové bázi, oleje, pryskyřice nebo gely a emulze, které však nesmí obsahovat vzduchové bubliny. V nově vyvíjených metodách se experimentuje se zkoušením bez vazebního prostředku.



Obr. 3.16 Princip detekce a zobrazení trhliny u odrazové (nahore) a průchodové (dole) metody [8]

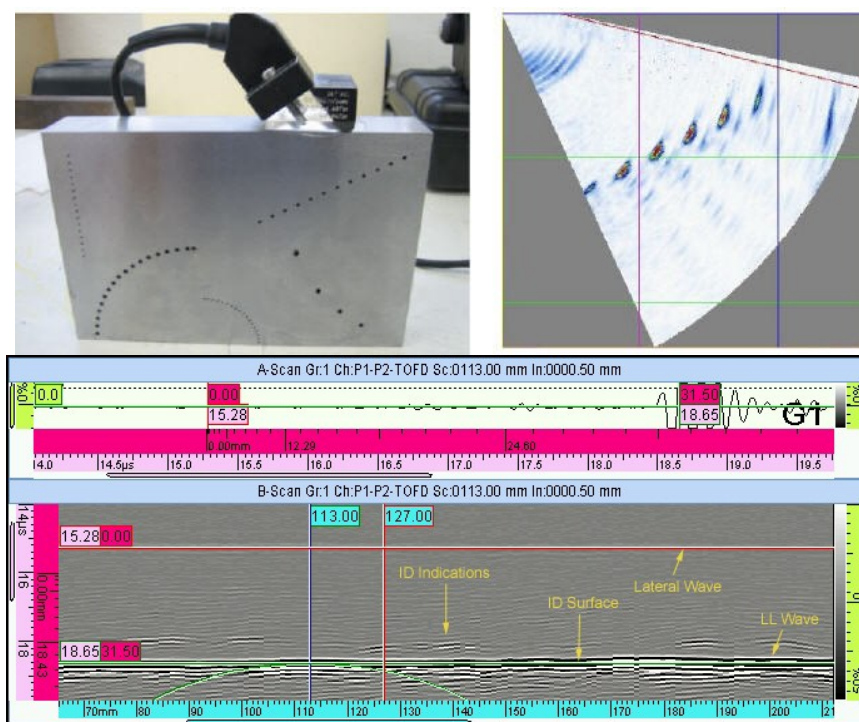
Přístroje určené pro zkoušení ultrazvukem jsou vybaveny displejem, který běžně dokáže pracovat ve třech módech (Obr. 3.17). Při zobrazení A-scan je na vodorovné ose zobrazen čas měření a na svislé ose amplituda signálu, tímto lze detekovat místa největších odchylek. U zobrazení B-scan lze vidět hloubkové rozložení vad v průřezu materiálu. Zobrazení C-scan dává přehled o plošném rozložení bez informací o hloubce nebo orientaci vady. Podobně, jako v jiných metodách, se pro co nejpresnější určení tvaru, velikosti a orientace necelistvosti používá měřky s umělými vadami (Obr. 3.17).



Obr. 3.17 Jednotlivá zobrazení (vlevo) [8] a použití měřky při zobrazení A-scan

Ultrazvukových vln se používá také k měření místní tloušťky materiálu, avšak je metoda vzhledem k malým úbytkům pro aplikaci v letectví málo přesná ( $\pm 0,02$  mm), takže se používá zřídka. Naopak čím dál více se lze v údržbě letadel setkat s technikou Phased array (viz Obr. 3.18), která se do jisté míry podobá ultrazvukovému vyšetření v medicíně. Sonda zde obsahuje velké množství samostatných měničů, pomocí správného nastavení zpoždění jednotlivých impulzů lze dosáhnout sektorového prozvučování a s účastí výpočetní techniky při jednom měření určit polohu a velikost necelistvostí. Toto je

obzvláště vhodné pro geometricky složité komponenty, jako jsou zámky lopatek turbín. Dalším druhem ultrazvukového zkoušení je technika TOFD (Obr. 3.18) určena především ke zkoušení svarů. Někdy se také uvádí jako třetí metoda po metodách průchodové a odrazové. Měří se při ní čas průchodu difrakčních vln, které se odrážejí od spodní a vrchní hrany vady a tím se zjistí její rozměr. Difrakce je v makroskopickém měřítku ohyb vlny a dochází k němu právě na hraně prostředí. Pro tuto metodu jsou zapotřebí dvě sondy: vysílací a přijímací.



Obr. 3.18 Zobrazení umělých vad metodou Phased Array (nahoře) a zobrazení zkoušeného svaru metodou TOFD

Zdroj: <<http://www.nde.com>>

Hlavní výhodou zkoušení ultrazvukem pro letectví je možnost použití metody na kompozity a další nevodivé materiály, jako je například guma na pneumatikách. U kompozitních materiálů se hledá především delaminaci. Zkouší se všechny druhy spojů, např. nýtové, šroubové a lepené. Právě pro zkoušku lepených spojů je ultrazvuková metoda prakticky nenahraditelná. Ultrazvukem se zkouší také komponenty turbínových motorů, např. hřídele, lopatky a zámky rotorových disků. Metoda Phased array je velmi výhodná pro rychlé prozkoumání oblasti na přítomnost koroze, avšak uplatňuje se i v jiných oblastech (např. Obr. 3.19).

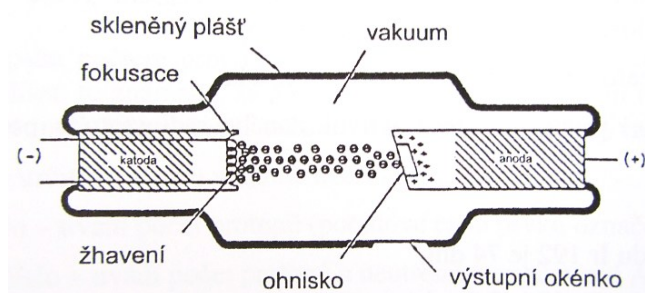


Obr. 3.19 Zkoušení podvozkové nohy metodou Phased array

Zdroj: <<http://www.aviationpros.com/article/10377226/the-power-of-ultrasonic-inspection>>

### 3.6 Prozařování

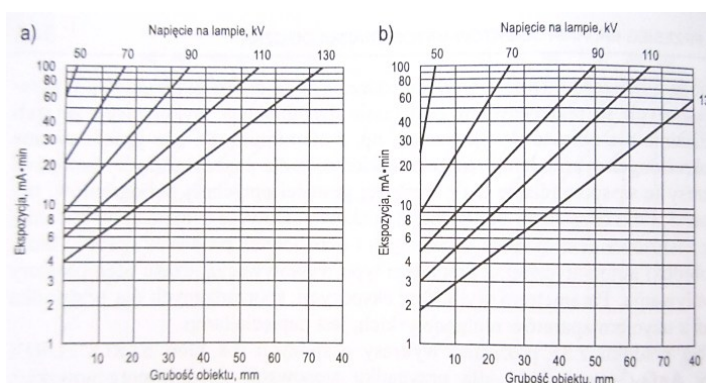
Při zkoušení prozařováním se k záznamu stavu materiálu využívá ionizačního záření. Jako zdroj záření se používá rentgenku (viz Obr. 3.20), ze které se získá rentgenové záření X nebo radioaktivní izotopy, ze kterých pochází záření gama. Radioaktivní izotopy nevyžadují vnější zdroj energie na rozdíl od rentgenky, avšak manipulace s nimi je ztížena neustálým vyzařováním. Záznam zvaný radiogramem je dvourozměrný stínový obraz trojrozměrných necelistvostí. Vady se promítají v rozměrech a tvarech dle roviny kolmé ke směru šíření záření. Rozdíl v zčernání radiogramu v místě vady a v oblasti bez ní reprezentuje informaci o výšce necelistvosti v rovině rovnoběžné se směrem šíření záření, avšak tato informace většinou není dostatečná. Přesnější údaje je možno získat pomocí metod stereografie, dvojí expozice a snímáním do pravého úhlu. Prozařování má ze všech popsaných metod (spolu s vizuální kontrolou, která se provádí prakticky vždy před aplikací prozařování) nejmenší nároky na vlastnosti materiálu, na které se metoda používá, kontrolovat lze prakticky všechny druhy materiálů využívané v letectví, záleží pouze na volbě zdroje záření a filmu s vhodnými parametry.



Obr. 3.20 Schéma rentgenky [1]

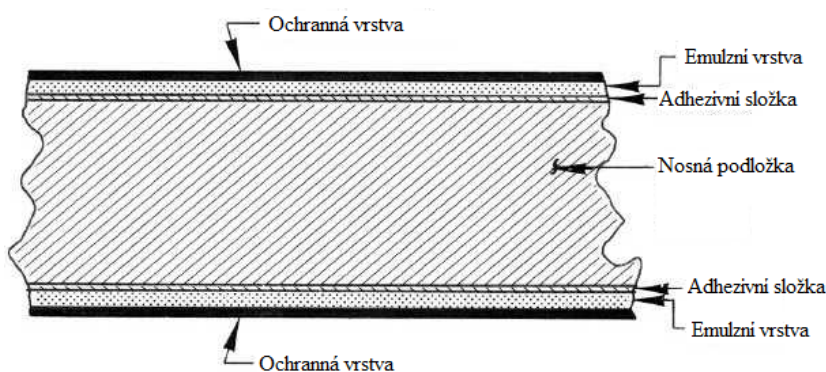


Během proniku záření materiálem dochází k jeho zeslabení, velikost zeslabení je tím větší, čím má materiál větší tloušťku a hustotu. V principu radiografie se jedná o zviditelnění rozdílných intenzit způsobených vadami, příp. rozdílnou tloušťkou stěn součástí. Volbou optimální energie zářiče se dosáhne správného zviditelnění požadovaných nečelistvostí. Kombinace tohoto parametru s expozičním časem dává široké možnosti pro dosažení čitelného kontrastu výsledného radiogramu. Pro správné určení času expozice se používají expoziční diagramy (viz Obr. 3.21), které pracují s druhem a tloušťkou materiálu, energií i typem dostupného zářiče vzdálenosti objektu od zářiče a následným zpracováním záznamu.



Obr. 3.21 Příklady expozičních diagramů [2]

Pro záznam zkoušky se používají filmy. Podle způsobu vzniku obrazu může být film luminiscenční nebo ionizační (např. rentgenový film). Průřez filmem je zobrazen na Obr. 3.22 a vypadá tak, že se na vnějších stranách nachází ochranná vrstva, pod ní je emulsní vrstva a uvnitř je uložena nosná podložka, která představuje nejtlustší vrstvu filmu.



Obr. 3.22 Řez rentgenovým filmem

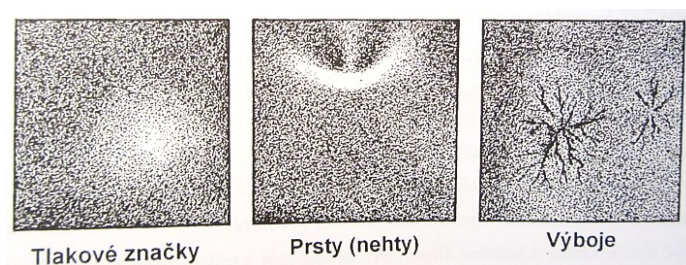
Zdroj: <[http://chemical-biological.tpub.com/TM-1-1500-335-23/css/TM-1-1500-335-23\\_528.htm](http://chemical-biological.tpub.com/TM-1-1500-335-23/css/TM-1-1500-335-23_528.htm)>



Citlivost filmu se popisuje pomocí křivky zčernání (D-křivky), dle které se vybírá film pro konkrétní použití. Na průběh křivky zčernání má největší vliv zrnitost filmu. Hrubozrné filmy jsou citlivější, avšak oproti jemnozrným zajišťují nižší kontrast. Pro zvýšení kontrastu při použití energeticky silnějších zářičů se používají kovové fólie, které působí jako filtr rozptýleného záření. Dále mají také zesilující účinek, tedy zvyšují velikost zčernání. Fluorescenční fólie, které obsahují látky vydávající viditelné světlo při působení ionizujícího záření, také zvyšují zčernání. Tyto fólie se používají u malých energií záření. Kombinací obou druhů jsou fluorometalické fólie. Pro zviditelnění obrazu na filmu se musí aplikovat proces vyvolání, při kterém se ionizované krystaly AgBr redukuje na kovové stříbro. Proces se dělí na 4 kroky:

1. Vývojka;
2. Přerušovací lázeň;
3. Ustalování;
4. Praní.

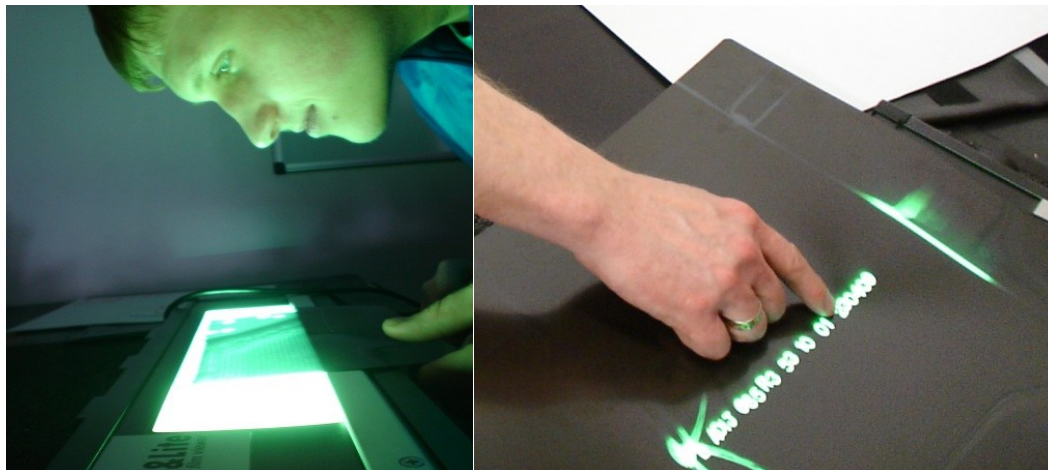
Během aplikace vývojky se používá kombinace chemikálií, která obsahuje akcelerátor pro odstranění ochranné vrstvy a redukční prostředek pro redukci AgBr na Ag. Časem dochází k vyčerpání vývojky, proto se regeneruje. Přerušovací lázeň zastaví působení vývojky a má za úkol chránit ustalovač. Ten rozpouští neosvětlená zrna AgBr, tedy zpřehledňuje a vytvrzuje film tak, aby byl chráněn před poškrábáním v dalších operacích. Praní je konečná čistící operace, po níž následuje zpravidla oplach a sušení filmu. Během manipulace s filmem může dojít k jeho poškození, které vede k tvorbě chybných indikací, tzv. artefaktů (Obr. 3.23).



Obr. 3.23 Příklady artefaktů [1]

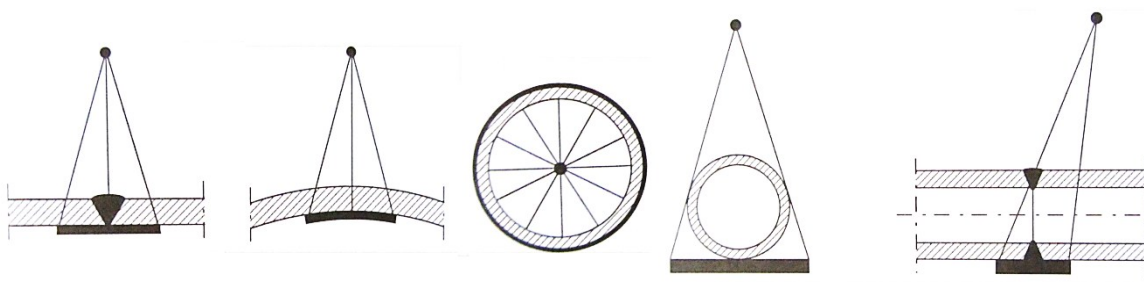
Samotné vyhodnocování se provádí pomocí negatoskopu (Obr. 3.24), který obsahuje plošný regulovatelný zdroj světla, nejčastěji halogenovou lampu, přičemž by světlo mělo

být zelené nebo bílé barvy. Podstatně méně používanou metodou je náhled na zkoušku v reálném čase, při němž se radiace transformuje na optický či elektrický signál a obraz může být zobrazen ihned; tuto metodu se rovněž nazývá radioskopií.



*Obr. 3.24 Náhled na snímek pomocí negatoskopu, vpravo viditelná čísla pro označení snímku*

Dle umístění zářiče a filmu se rozlišuje několik způsobů prozařování. Volba způsobu je podmíněna zkoumaným dílem. Vzhledem k povaze záření je pro objekty s kruhovým průřezem nejvýhodnější použít centrickou projekci, při které se zářič umístí doprostřed zkoumaného objektu a film se nachází na vnější stěně po obvodu objektu. Toto lze použít při zkoumání trupu letounu v kritických místech spojů potahových plechů. V tomto případě se jedná o prozařování přes jednu stěnu. Obecně se u dílů s kruhovým průřezem provádí prozařování přes jednu nebo přes dvě stěny dle možností, jak ukazuje Obr. 3.25.

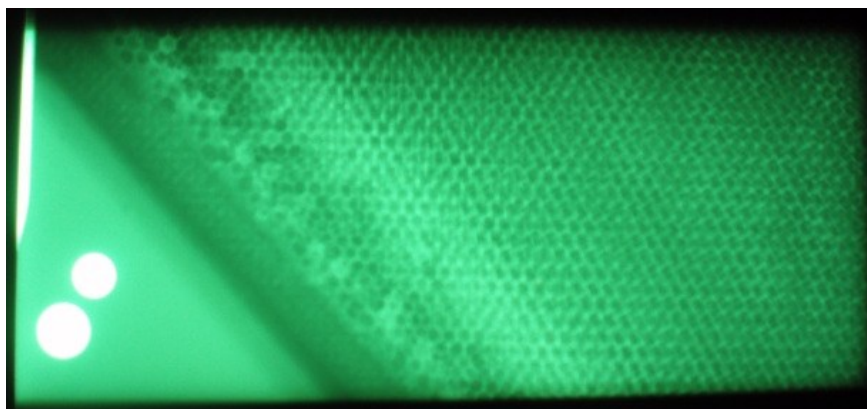


*Obr. 3.25 Prozařování přes jednu (tři případy zleva) a dvě stěny [2]*

Pro snadnou identifikaci zkoušeného dílu se v jeho blízkosti umísťuje kovové číslice a písmena, které popisují daný objekt a objevují se na výsledném radiogramu (viz Obr. 3.24). Podobně se značí poloha objektu. Pro ověření detekčních schopností se používá

měrek. Jedná se především o měrky drátkové a otvorové dle použitých tvarů. Přesnost projekce tvarů na radiogramu dává představu o správné volbě parametrů zkoušky. Měrky jsou často stupňové, tedy s různou tloušťkou pro ověření citlivosti na změnu tloušťky při konkrétním měření.

V letectví se prozařování používá pro širokou škálu materiálů. Provádí se kontrola potahu (především spojů) a kritických částí nosné konstrukce, aplikuje se také na větší šroubové a nýtové spoje, svary. Má využití při zkouškách kompozitních materiálů se sendvičovou a voštinovou strukturou (Obr. 3.26), na které často nelze použít ultrazvukové metody. Naopak s ní nelze zjišťovat delaminaci. Prozařuje se také částí pohonné jednotky. Zjistitelná je rovněž koroze. Při zkouškách je nutno dbát bezpečnosti, protože ionizující záření může mít neblahý vliv na zdraví pracovníků. Z tohoto důvodu se často tyto zkoušky v letecké údržbě plánují na dobu se slabším provozem a pohybem nezúčastněných osob, např. noční směnu.



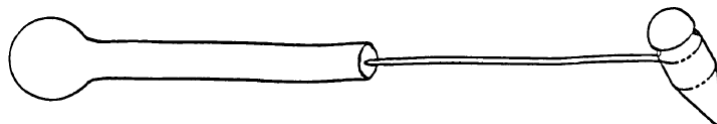
*Obr. 3.26 Radiogram voštinové struktury na směrovém kormidle*

### **3.7 Akustické metody**

Akustické metody nelze přímo zařadit do povrchových či objemových metod, jelikož způsob jejich využití v letectví neodpovídá ani jedné ze dvou definicí. Jsou používány pro prosté zjištění přítomnosti vady bez možnosti určení jejího rozsahu, jejich výhodou je ale rychlost použití.

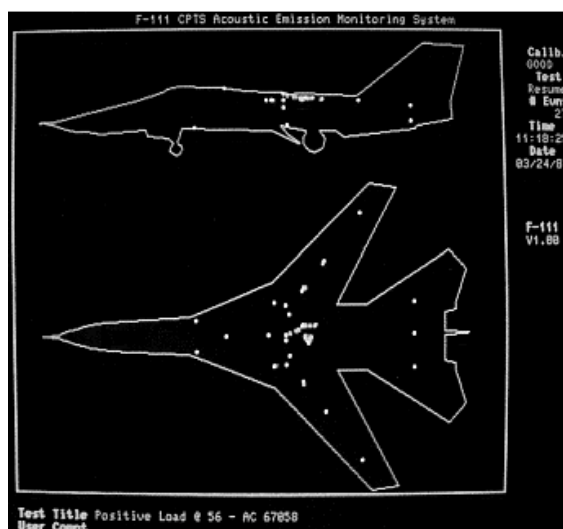
Zkouška rázem (ang. Tap Testing) je jednoduchá metoda vyhodnocení přítomnosti delaminace nebo povolení spojů. Pracovník speciálním kladívkem, které je vyobrazeno na

Obr. 3.27, udeří do zkoušeného povrchu a podle zvukové odezvy určí, zda se tam vyskytuje chyba. Nevýhodou metody je její subjektivita, tedy požadavek vysokých zkušeností pracovníka vzhledem k tomu, že je odezva různá pro různé tvary a struktury.



Obr. 3.27 Kladívko pro Tap Testing [8]

Při aplikaci metody akustické emise na letecké technice se na zkoušenou oblast umístí senzory (viz Obr. 3.28) a je třeba zavést do struktury síly způsobující mechanické namáhání. V závislosti na druhu objektu to může být namáhání ohybem, torzní namáhání, tepelné namáhání nebo namáhání tlakem vzduchu. Tento druh je mimo letectví nejvíce používán pro zkoušky těsnosti tlakových nádrží, rovněž na letounu se takto zkouší hermetičnost přetlakovaných částí trupu. Namáhána oblast s poškozením emituje akustický signál v podobě ultrazvukových rázů a zvukových vln, které jsou detekovány pomocí senzorů. Takto lze odhalit trhliny i korozi. Frekvence vlnění je závislá na velikosti vad. Výhodou metody je možnost jejího použití na velké oblasti při jednom měření a použitelnost na širokou škálu materiálů. Vzhledem ke komplexnosti a objemu získaných dat prochází metoda akustické emise pro použití v letectví stálým výzkumem a intenzivním vývojem.



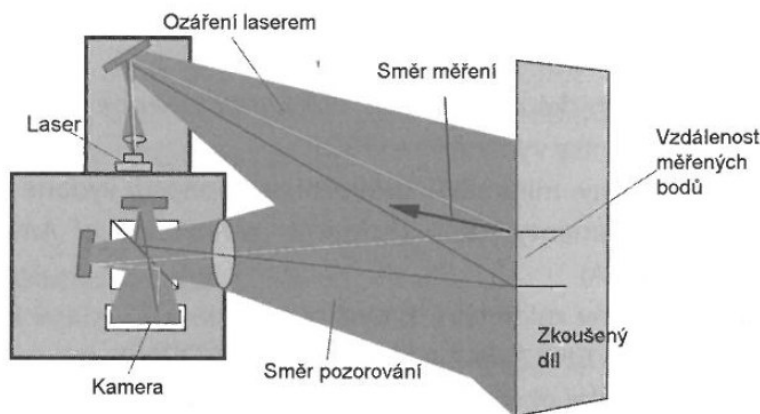
Obr. 3.28 Umístění senzorů během zkoušek stíhacího letounu

Zdroj: <<http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn755/idn755.htm>>

### 3.8 Holografie a shearografie

Společným rysem holografie a shearografie je to, že se měří objekt během jeho zatěžování. Holografie využívá dvou laserových hlavic, z nichž je jedna referenční a druhá objektová. Cílem je vytvořit trojrozměrný obraz zatěžovaného objektu pomocí snímání obrazu z hlavic. Vady jsou pak detekovatelné na filmovém záznamu. Metoda je nejčastěji používána pro rychlé zkoušky kompozitních materiálů.

Shearografie je v jistém smyslu rozšířením holografie a je pro letectví vhodnější. Také využívá dvou zdrojů laserového záření, které jsou po odrazu od dvou bodů na zkoušeném objektu promítnuty do jednoho bodu, čímž vzniká interferenční obrazec rozdílný pro nezatížený a zatížený objekt (Obr. 3.29). Zobrazování deformace probíhá v reálném čase a je proto možné velmi rychle určit místa defektů. Zjišťovat lze delaminaci a rozlepení kompozitních materiálů, dále únavové trhliny a praskliny (Obr. 3.29). Zkouší se také voštinové struktury na klapkách a kormidlech. Při správné volbě zatěžovací síly jsou odhalitelné i podpovrchové vady. Z důvodu použití laserů u obou metod, je třeba dbát předpisů bezpečnosti práce pro obsluhu laserových zařízení.



Obr. 3.29 Princip shearografie [7] a aplikace na letounu Airbus A330

Zdroj:

<[http://femtosecondsystems.com/Aerospace%20NDT%20with%20Advanced%20Laser%20Shearography/Aerospace%20NDT%20with%20Advanced%20Laser%20Shearography\\_534.pdf](http://femtosecondsystems.com/Aerospace%20NDT%20with%20Advanced%20Laser%20Shearography/Aerospace%20NDT%20with%20Advanced%20Laser%20Shearography_534.pdf)>

## **4 INOVATIVNÍ METODY NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ V LETECTVÍ**

Údržba letadel je v porovnání s jinými odvětvími údržby konzervativnější z důvodu poměrně přísné legislativy. Z tohoto důvodu průnik nových nedestruktivních metod technické diagnostiky do letectví je pomalejší než jinde. Avšak i zde probíhá neustálé hledání lepších technik a postupů, které zjednoduší, urychlí nebo zlevní ty stávající. V tomto směru jsou výhodou poměrně značné náklady na údržbu, které jsou letecké společnosti nuceny nést pro udržení velmi vysokých bezpečnostních ukazatelů, takže se vyplácí investovat i do drahého zařízení a výzkumu, jestliže to může v konečném rozpočtu přinést finanční zisk. Nejedná se přitom pouze o zlevnění samotných zkoušek, ale také o zkrácení potřebného času, který může být využit na letecké práce, tedy přepravu cestujících a nákladu za úplatu.

### **4.1 Metoda magnetické paměti kovu**

Pro tvorbu této podkapitoly byla využita literatura [4], [6].

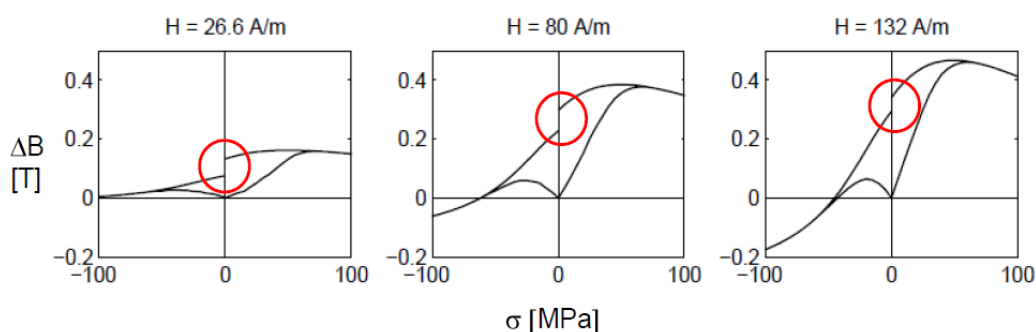
Vývoj metody magnetické paměti kovu (MMM – Metal Magnetic Memory) trvá již asi 30 let a v poslední době je spjat především s ruskou společností Energiodiagnostika. Největším přínosem metody je možnost odhalování míst s pravděpodobností vzniku vady ještě dříve, než dojde k její iniciaci. Výhodou je také fakt, že je metoda pasivní, tedy nevyžaduje zavádění energie (např. elektromagnetického pole) do zkoumané oblasti, protože pracuje pomocí přirozeného magnetického pole Země. Tyto skutečnosti ji předurčují k rozsáhlému použití v průmyslu.

#### **4.1.1 Fyzikální princip a možnosti použití**

Podstata metody MMM spočívá ve využití magnetomechanických jevů, ke kterým dochází v kovech (viz Obr. 4.1). Ferromagnetický materiál je v magnetickém poli Země od něj namagnetován a během vykonávání práce je díl vystaven vlivům okolních magnetických polí, takže v klidovém stavu se v něm nacházejí zbytková magnetická pole. Samotná intenzita magnetického pole  $H_p$  nemá ovšem na provoz žádný vliv. Teprve její



gradient  $dH_p/dx$  je směrodatný pro určení stavu materiálu. Bylo zjištěno, že povrchové i podpovrchové pnutí, které může vyvolat iniciaci trhliny, mění v daném místě intenzitu magnetického pole. Zjistitelné jsou i trhliny již vzniklé, jelikož se koncentrace mechanického napětí nachází na jejich koncích. Směrodatná je velikost a strmost gradientu.



Obr. 4.1 Vliv jednoho cyklu tahu/tlaku na změnu magnetizace ocelového vzorku [6]

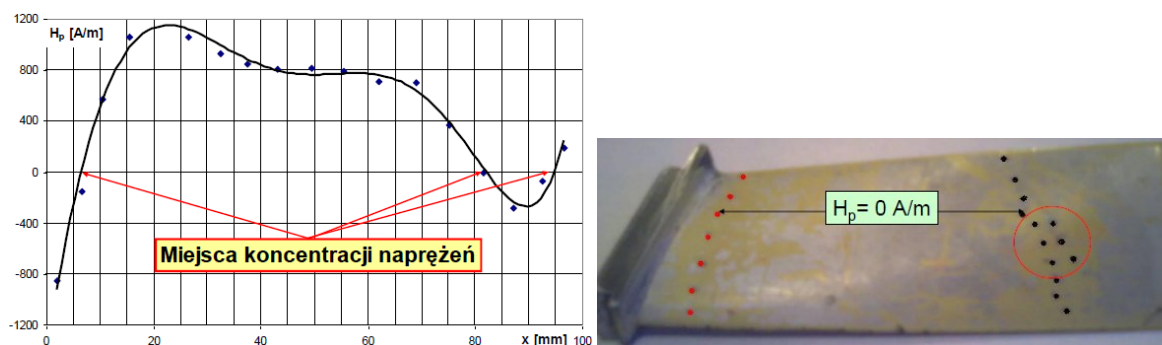
Metoda magnetické paměti kovu je použitelná na ferromagnetické kovy a jejich slitiny. Zkoušky lze provádět i skrz nemagnetické materiály, takže není vyžadováno čištění nebo jakákoli úprava povrchu a metoda je bezkontaktní. Zkoušený díl nesmí být ovšem vystavován vlivům jiných umělých magnetických polí, měření také nelze provádět v blízkosti zdrojů elektromagnetického pole, mj. vzniklého během svařování. Dalšími výhodami metody je rychlost, opakovatelnost a v některých případech i možnost zkoušení za provozu. K běžným aplikacím patří zkoušení plynovodů a jiných potrubí, kolejíšť, tlakových nádrží, velkých turbín, ozubených kol a svarů. Pro malé díly se používá v podstatně menší míře.

#### 4.1.2 Využití metody v letectví

Myšlenka aplikace metody MMM na letecké technice není úplně nová. V současné době se experimentuje s použitím na vojenských letounech, avšak v literatuře se nevyskytují zmínky o zkouškách v civilním sektoru. Je to pochopitelné především z důvodu podstatně menšího legislativního omezování vojenského letectví, které se řídí národními předpisy. Proto zde existuje možnost rychlého zavedení inovativních metod. V civilním letectví se klade podstatně větší důraz na spolehlivost metod a pro zavádění nových je potřebný zřetelně delší čas. Metodu magnetické paměti kovu lze v podstatě

aplikovat na tytéž prvky, na kterých se provádí zkoušení metodou rozptylových toků s tím, že metody nejsou zaměnitelné, jelikož jsou založeny na rozdílných principech.

Jako nejvhodnější pro použití metody MMM se jeví cyklicky namáhané letadlové celky. Příkladem zde mohou být rotující prvky pohonných jednotek a díly podvozku. Zkoušky aplikace metody na lopatky kompresoru (celkem 310 kusů) a hřídel leteckého motoru SO-3 z cvičného proudového letounu TS-11 Iskra se konaly v roce 2008 v Instytutu Technicznym Wojsk Lotniczych ve Varšavě. Vzhledem k povaze provozu těchto částí se testy soustřeďovaly na vysokocyklickou únavu, avšak zahrnovaly také výzkum v nízkocyklické oblasti a byly spojeny s pravidelnou prohlídkou a zkoušením pomocí metody rozptylových toků s Hallovoou sondou. Dodatečně se experiment vyhodnocoval pomocí ultrazvuku a vířivých proudů. Ve výsledku bylo zjištěno, že je metoda použitelná pro nízkocyklické namáhání. Pro vysokocyklické namáhání a křehký lom jsou měření v současné podobě nepoužitelné. Není to ovšem dáno omezením samotné metody, ale tím, že je algoritmus pro výpočet gradientu optimalizován pro standardní aplikace. Součástí, na kterých se měření provádělo, pracují ve víceosé napjatosti a jsou vystaveny vlivům dalších magnetických polí. Na Obr. 4.2 je zobrazena lopatka kompresoru, na níž přístroj špatně určil dvě oblasti koncentrace napětí na vrcholku listu kvůli příliš velikým rozměrům sondy. Metoda byla tedy vyhodnocena jako použitelná v omezené míře, spíše v kombinaci s dalšími metodami.



Obr. 4.2 Výsledky měření na lopatce kompresoru motoru SO-3, označena jsou místa koncentrace napětí [6]

#### 4.1.3 Praktická aplikace na letecké technice

Dle teoretických předpokladů lze metodu použít pro ferromagnetické slitiny. Vzhledem k rostoucímu podílu kompozitních materiálů, hliníkových a titanových slitin na

letounu v porovnání s ocelí jsou možnosti aplikace metody MMM při běžné prohlídce značně omezeny. Během provádění měření byl přístup možný pouze k viditelným částem letounu, nebylo tedy možno provést zkoušení vnitřních částí pohonné jednotky, jak je uvedeno v podkapitole 4.1.2. Postupně byly odzkoušeny tyto objekty:

- disk podvozkového kola letounu SAAB 340;
- dmychadlový list turbodmychadlového motoru CFM-56 letounu Boeing 737-800;
- podvozková noha letounu Boeing 737-800;
- vyhřívací tělísko odmrazovacího systému na vrtuli letounu SAAB 340.

U tří prvních objektů (viz Obr. 4.3 a Obr. 4.4 vlevo) bylo zjištěno, že je obsah ferromagnetických složek ve slitinách příliš nízký, takže měření nemohlo být provedeno a vyhodnoceno. Vyhřívací tělísko (viz Obr. 4.4 uprostřed a vpravo), které obsahuje rezistor, jenž se nahřívá průchodem elektrického proudu, indikovalo jistou malou změnu magnetického pole, avšak vzhledem k tomu, že je při provozu vystavováno působení silného elektromagnetického pole, dá se předpokládat, že by přítomnost trhliny výrazně neovlivnila tvar zbytkových magnetických polí.



*Obr. 4.3 Měření na letounu Boeing 737 – lopatky dmychadla (vlevo) a podvozková noha (vpravo)*



*Obr. 4.4 Měření na letounu SAAB 340 – disk podvozkového kola (vlevo) a vyhřívací tělísko odmrazovacího systému vrtule (uprostřed a vpravo)*

Obecně lze konstatovat, že na moderním dopravním letounu při běžné prohlídce nenachází metoda MMM uplatnění. Její použití pro revize pracovních částí pohonných jednotek může mít v budoucnu místo, avšak je k tomu potřebný vývoj specializovaných algoritmů a také výroba nových menších senzorů, které by bylo možné použít ve stísněném prostoru motoru bez nutnosti demontáže jednotlivých prvků.

## **4.2 Termovize**

Pro tvorbu této podkapitoly byla využita literatura [4], [5], [14], [15], [16].

Vývoj infračervených kamer v posledních letech umožnil jejich široké uplatnění v technické praxi. Zařízení jsou přenosná, vybavena LCD obrazovkami, umožňujícími okamžité vyhodnocení technického stavu zkoušeného objektu. Ukládání záznamu do paměti přístroje a jejich pozdější vyhodnocení dává další možnosti verifikace provedených měření. Tímto se stává termovize jednou z nejuniverzálnějších nedestruktivních metod technické diagnostiky.

### **4.2.1 Fyzikální princip**

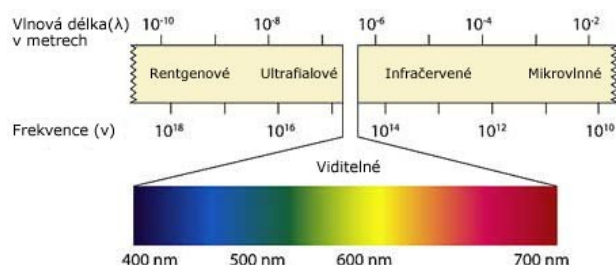
Podle termodynamických zákonů má každé reálné těleso teplotu vyšší než je 0 K (absolutní nula). Teplota tělesa je stavovou funkcí určující termodynamickou rovnováhou. Teplotu lze měřit pouze nepřímou a to dotykově nebo bezdotykově. Dotykové měření teploty má podstatně delší historii a teploměry se dělí podle toho, které fyzikální zákony využívají pro svou funkci. V současnosti ve velké míře pracují na principech spojených s elektrickými zákony. Rozdělují se tedy na teploměry:

- dilatační – využívající tepelnou roztažnost těles. Dále lze vydělit skupiny teploměrů s tekutým médiem (rtuť, etanol), plynným médiem (využívající změnu tlaku se změnou teploty) a bimetalické teploměry, které se skládají vždy ze dvou pevně spojených kovových materiálů s různou tepelnou roztažností nejčastěji svinutých v pouzdře;
- odporové – je využíván jev růstu elektrického odporu při narůstající teplotě, nejčastějším materiálem je zde platina;

- polovodičové – jsou založeny na jevech v polovodičových materiálech, v převážné míře se jedná o změnu elektrického odporu, který může podle materiálu s teplotou klesat nebo růst;
- termoelektrické – využívající termoelektrický jev, při kterém vzniká elektrické napětí mezi konci vodiče složeného ze dvou různých vodivých materiálu, jestliže mají tyto konce jinou teplotu.

Kromě toho se v technické praxi využívá teplotních ukazatelů, pomocí kterých lze určit přibližnou teplotu objektu. Existují ukazatele pro jedno použití, u kterých dochází k nevratným změnám po dosažení určité teploty nebo vícenásobně použitelné ukazatelé. Mohou být ve formě barevných či luminiscenčních nálepek, prášku, tekutiny, příp. nátěru, časté jsou i keramické jehly.

Pro termovizní měření se používá druhý způsob určování teploty, tedy bezdotykový. Každé těleso emituje tepelné záření ve viditelné i neviditelné části spektra elektromagnetického záření. Termovizní kamera snímá ve spektru infračerveného záření. Jedná se o záření, kterého vlna je delší než v případě viditelného světla (viz Obr. 4.5). Vlnová délka se pohybuje v rozmezí asi 0,75  $\mu\text{m}$  až 1 mm. Vznik infračerveného záření je dán vnitřním pohybem částic v objektu. Intenzita tohoto pohybu roste s teplotou.

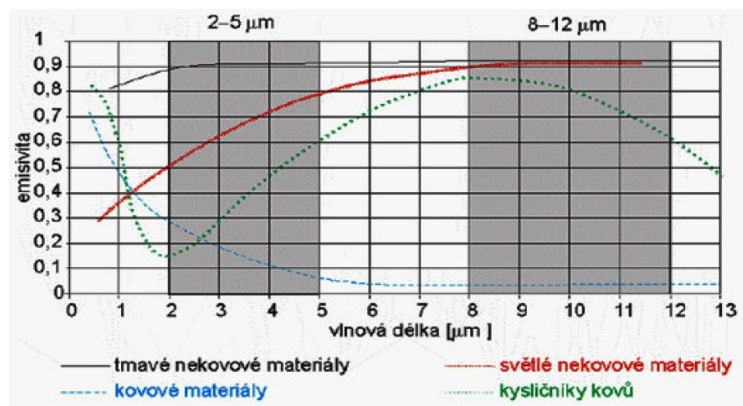


Obr. 4.5 Frekvenční spektrum elektromagnetického záření s vymezenou oblastí infračerveného záření

Zdroj: <<http://www.netcam.cz/encyklopedie-ip-zabezpeceni/denni-a-nocni-videni.php>>

Důležitým parametrem pro měření je emisivita. Jedná se o míru schopnosti daného povrchu vyzařovat energii. Pro určení konkrétní hodnoty emisivity povrchu se jej porovnává s absolutně černým tělesem, které má emisivitu rovnou 1 a dokonale vyleštěným zrcadlem s emisivitou rovnou 0. Hodnota emisivity se specifikuje vždy pro určitou teplotu, vlnovou délku a pohybuje se v rozmezí 0 až 1 (viz Obr. 4.6). Správné určení emisivity je stěžejní problém během měření, především při vysokých hodnotách

jsou jí výsledky výrazně ovlivněny. Z tohoto pohledu má na měření velký vliv i okolní teplota. Těleso v jistém smyslu odráží tepelné záření z okolí a z toho důvodu mohou být výsledky nepřesné.



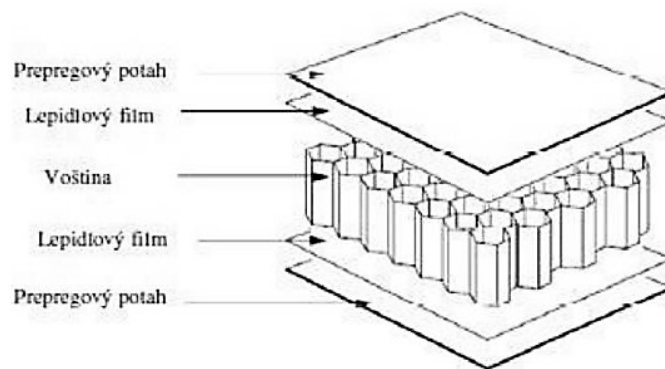
Obr. 4.6 Závislost emisivity na vlnové délce [4]

#### 4.2.2 Aplikace v letectví

Během posledních let probíhaly na letecké technice mnohé zkoušky s aplikací termovizního měření k detekci vad. Principiálně se jednalo vždy o umělé nahřívání nebo ochlazování zkoušené oblasti, která se následně snímala termovizní kamerou. Podle struktury materiálu, na který se metoda aplikovala, se necelistvostí určitým způsobem zobrazovaly. Nejvíce se ovšem termovize začala uplatňovat na voštinových strukturách.

Voština je speciální materiál, který je používán jako jádro pro sendvičové kompozity. Svým vzhledem připomíná včelí plást (viz Obr. 4.7). První použití těchto struktur se datuje na 30. léta XX. století a jádrem byl hliníkový plech. Voštinové sendviče mají natolik dobré mechanické vlastnosti při poměrně nízké hmotnosti, že se nyní používají v širokém spektru aplikací. V dnešní době se jako jádro uplatňují především skleněné, uhlíkové nebo kevlarové tkaniny. Potahy buňky voštinové struktury mají vzhled papíru a jsou vyráběny ze stejných materiálů jako jádro. Mezi potahem a jádrem se nachází lepidlový film, který zajišťuje soudržnost sendviče. V letectví se voštinové kompozity používají především na řídicí plochy, tj. křídélka, vztlakové klapky a výškové i směrové kormidlo na ocasních plochách. V některých případech je možno voštinu najít i v konstrukcích ohňových stěn, které mají za účel oddělit posádku od prostoru pohonné jednotky a ochránit ji tak před popáleninami v případě požáru motoru, což je nutné u jednomotorových letounů, příp. u vrtulníků. V této aplikaci se využívá uhlíkový potah i jádro.





Obr. 4.7 Voštinová struktura [14]

Vzhledem k charakteru voštinové konstrukce a provozu dopravního letounu představuje největší problém v údržbě vnik vody do prostoru buněk voštiny. Vznik mikrotrhlin na těchto místech je nasnadě. Především vztlakové klapky (Obr. 4.8) jsou vystaveny neustálým nárazům šterku a písku spod podvozkových kol, ale také jiné plochy mohou být poškozeny, například krupobitím. Přítomnost vody v buňkách voštiny je problematická nejen z důvodu koroze, ale také kvůli nízkým teplotám ve velkých výškách, kde tuhne na led, který má větší objem, a tím dochází k mechanickému namáhání stěn buňky i potahu. Především v místech, kde má voština menší výšku a buňka se vyznačuje menším objemem, může dojít až k porušení samotné struktury.



Obr. 4.8 Vztlakové klapky vysunuty při přistání

Zdroj: <[http://www.airliners.net/aviation-forums/tech\\_ops/read.main/201570/](http://www.airliners.net/aviation-forums/tech_ops/read.main/201570/)>

#### 4.2.3 Předpisová základna

Největší výrobci dopravních letounů, čili společnosti Boeing a Airbus, již zařadili zkoušky voštinových struktur termovizní metodou do svých příruček pro údržbu (AMM). Z důvodu pozdější praktické aplikace je vhodné se soustředit pouze na příručku vydanou

společnosti Airbus pro letouny A318, A319, A320 a A321, které sdílejí většinu konstrukčních prvků a liší se pouze délkou trupu, tedy přepravní kapacitou, případně dalšími parametry, které nemají na samotný postup zkoušení žádný vliv. Tyto modely jsou označovány za první dopravní letouny, na kterých se ve velké míře uplatnily kompozitní materiály (Obr. 4.9).



*Obr. 4.9 Letouny z tzv. Airbus A320 family*

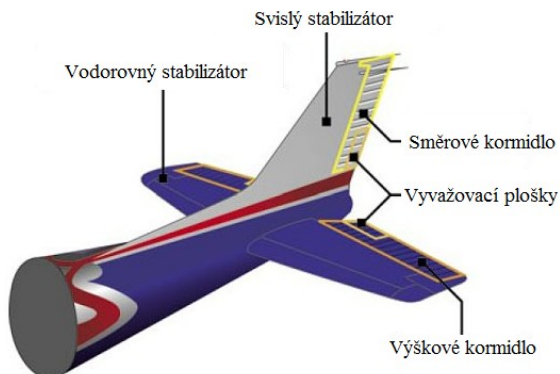
*Zdroj:*

*<[http://www.leoni.com/ENGLISCH.177.0.html?L=1&tx\\_ttnews%5Bpointer%5D=1&tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=765&no\\_cache=1](http://www.leoni.com/ENGLISCH.177.0.html?L=1&tx_ttnews%5Bpointer%5D=1&tx_ttnews%5Btt_news%5D=765&no_cache=1)>*

Airbus S.A.S. je v současné době nejvýznamnější výrobce proudových dopravních letounů, co se týče počtu vyrobených či objednaných kusů, byť v tomto ohledu vede jen těsně před americkým Boeingem. Společnost byla založena na základě dohody několika evropských zemí s největším podílem Francie a Německa, dále Velké Británie a Španělska. Montáž hotových letadel se koná v Toulouse ve Francii nebo v německém Hamburku. Je výrobcem největšího dopravního letadla současnosti – modelu A380, který může v maximální verzi pojmout 840 cestujících. Kromě civilních strojů, které jsou hlavním výrobkem společnosti, vyrábí Airbus také vojenská letadla, např. A400M nebo civilní modely uzpůsobené pro využití armádou.

V další části bude popsán postup zkoušení pro směrové kormidlo (viz Obr. 4.10). Termovizní měření je určeno pro všeobecnou kontrolu voštinových struktur se sklolaminátovým potahem k nalezení tekutin, které vnikly dovnitř buněk. Pro zkoušku se doporučuje spolupráce dvou osob: NDT inspektora a asistenta. Asistent obsluhuje termovizní kameru, inspektor provádí zahřívání a označuje možné nálezy. Jsou určeny dva postupy na základě teploty okolního vzduchu. Při teplotě 10 °C až 35 °C se aplikuje postup

A, při teplotách vyšších než 35 °C postup B, který se liší především tím, že se místo ohřívání daný povrch ochlazuje. Ochlazování se provádí pomocí nástřikové pistole, odpařováním se odebírá teplo z povrchu a tím se snižuje jeho teplota.

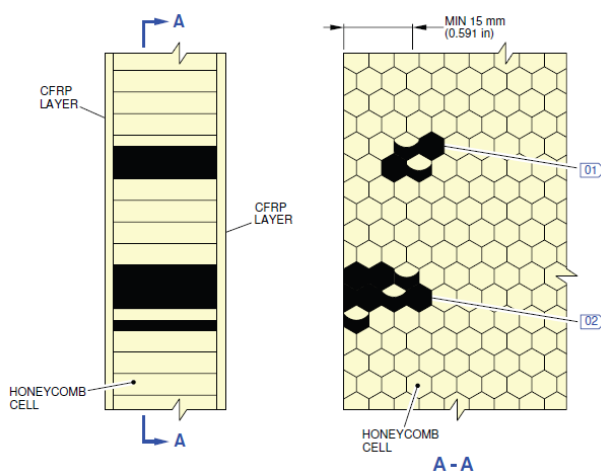


Obr. 4.10 Ocasní plochy klasického uspořádání

Zdroj: <[http://www.ahrtp.com/RSS-JSfeeds/Fly\\_By\\_Wire.htm](http://www.ahrtp.com/RSS-JSfeeds/Fly_By_Wire.htm)>

Zkouška se může provádět pouze na neporušeném povrchu s tloušťkou potahu 0,4 mm až 1,5 mm, výškou voštiny 30 mm až 40 mm, velikostí buňky 4,8 mm až 6,4 mm. Minimální zjištěitelné množství vody je pak 6 ml. Jako vadu se označuje nález, u kterého:

- buňky vyplněné tekutinou minimálně z 50% svého objemu se nacházejí na ploše rovné nebo větší než 200 mm<sup>2</sup>;
- vyplněné buňky vzájemně sousedí;
- vyplněné buňky zasahují alespoň na 15 mm od okraje kormidla. Viz Obr. 4.11.



Obr. 4.11 Schématické zobrazení vzhledu indikace označené za vadu [5]

Popsáno je také základní a dodatečné vybavení, které se používá pro zkoušky, příp. také jeho parametry. Je to:

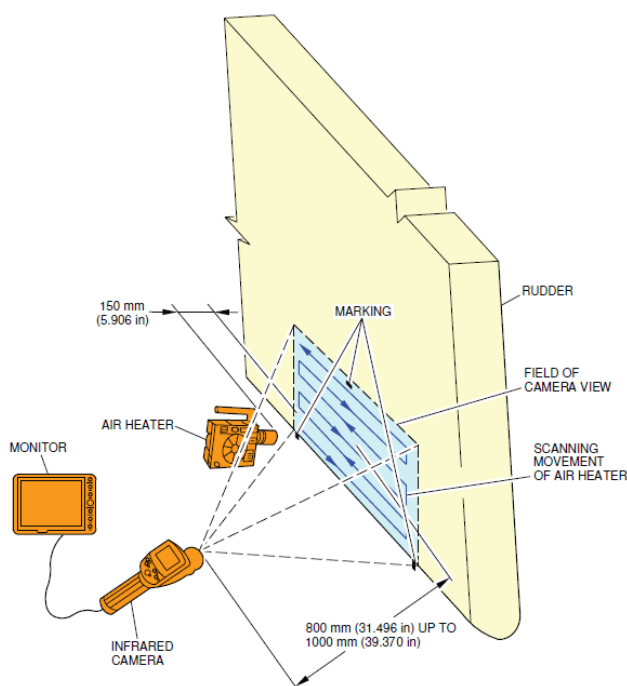
- přenosná termokamera;
- ohřívač vzduchu (minimální parametry: průtok 400 l/min, tlak 2 mbar, výstupní teplota 150 °C až 160 °C);
- digitální dotykový teploměr s povrchovou sondou (rozsah 0 °C až 100 °C);
- přenosný monitor (nejméně 8 palcová úhlopříčka, barevný TFT displej, systém: PAL, SECAM, NTSC);
- připojovací kabel (Standard RCA Composite Video, delší než 2000 mm);
- trojnožka pro stabilizaci termokamery;
- transformátor 110 V / 220 V (minimálně 4000 W), jestliže je hodnota síťového napětí 110 V.

Zvláštní minimální požadavky na termokameru:

- zobrazování v reálném čase;
- automatické nastavení jasu a kontrastu;
- zorné pole  $24^{\circ} \times 18^{\circ}$  až  $34^{\circ} \times 25^{\circ}$ ;
- citlivost 0,2 °C při okamžité teplotě okolí;
- teplotní rozsah -20 °C až 120 °C;
- zobrazování ve stupních šedé (světlejší znamená vyšší teplotu);
- minimální vzdálenost zaostření nejvýše 500 mm.

Výrobce doporučena termokamera FLIR T250 značně překonává požadované parametry, čímž se dosahuje větší přesnosti měření a jistoty v případě výskytu nálezů. Měření na směrovém kormidle se provádí pouze ve svislé poloze, což platí také pro demontované kormidlo, které je pak třeba v této poloze upevnit. Doporučuje se měřit v hangáru, aby nedošlo k nechtěnému ohřevu slunečním zářením, navíc je třeba dbát, aby se poblíž zkoušeného místa nevyskytovaly zdroje vyzařující teplo nebo chlad. Povrch kormidla musí být hladký a čistý. V případě aplikace postupu B se na povrchu mohou vyskytovat kapky vody, ovšem nesmí být příliš veliké, aby neovlivňovaly měření. Před samotným zahájením zkoušky se provádí vizuální kontrola, zda nejsou na povrchu

viditelné trhliny, necelistvosti a pozůstatosti po provedených opravách, které by mohly znehodnotit výsledky. Během příprav, samotného měření a označování možných nálezů je velmi důležité, aby se personál nedotýkal zkoušené oblasti. Průběh zkoušení je schematicky zobrazen na Obr. 4.12.

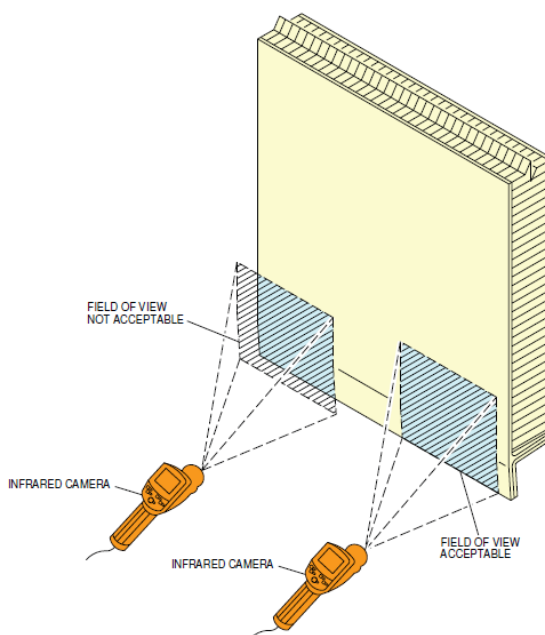


Obr. 4.12 Schématické zobrazení průběhu zkoušky [5]

Při měření má mít kamera nastavenou emisivitu rovnou 1, automatické zaostřování a zobrazení ve stupních šedé se zobrazováním horkých míst jako světlejších. Infračervená kamera by se měla nacházet ve vzdálenosti 800 mm až 1000 mm od zkoušeného povrchu, snímání se má provádět v poloze kolmé k povrchu. Je nutné, aby se v zorném poli objevil pouze daný povrch, chybou je snímání jiných objektů, případně stěn, podlahy hangáru, atd (viz Obr. 4.13). Teplota povrchu při nahřívání nesmí překročit 55 °C, je také vhodné dbát na to, aby byla maximální teplota ohřívače 160 °C. Pro kontrolu se může použít digitální dotykový teploměr, přičemž vzhledem k nastavené emisivitě rovné 1, nesmí být naměřená teplota vyšší než teplota udávána termokamerou. Pokud je tomu jinak, je pravděpodobné, že není kamera správně nastavena, případně došlo k poruše zařízení. Nahřívání by mělo být podle možností co nejrovnoměrnější. V krátkých intervalech se náhřev přerušuje pro sledování teploty objektu pomocí infračervené kamery, případně se značí tmavší místa, tedy s nižší teplotou, mohoucí znamenat tekutinu uvnitř buňky. Jestliže se objeví indikace,



provádí se verifikace měření pomocí prozařování nebo ultrazvukové kontroly. Všechny indikace, které nelze identifikovat jako překrytí vrstev potahu, nahromadění lepidlového filmu, vměstky nebo neregulérnosti povrchu jsou považovány za přítomnost vody uvnitř buněk. Tyto indikace je nutno zaznamenat pro další vyhodnocení, provedení opravy nebo pouhé sledování změn, jestliže nepředstavují nebezpečí pro další provoz. V posledním kroku se povrch očistí od značení.



*Obr. 4.13 Akceptovatelné (vpravo) a neakceptovatelné (vlevo) snímání [5]*

#### **4.2.4 Průběh měření**

Zkoušky termovizní metodou byly provedeny v opravárenském centru Job Air na letišti Leoše Janáčka v Mošnově (Ostrava Airport, LKMT, OSR) na letounu Airbus A319-111 výrobního čísla 2465, v současnosti s registrací EI-EYL (Obr. 4.14). Provozovatelem je ruská společnost Rossiya - Russian Airlines, majitelem leasingová společnost GECAS, která je součástí korporace General Electric. Předchozím provozovatelem stroje byl americký přepravce Frontier Airlines, kde nesl jméno Jack a číslo 940. Letoun byl zalétán dne 27.4.2005 a v Ostravě se nacházel v době od 10.2.2013 do 25.4.2013 především z důvodu změny uspořádání a vzhledu interiéru. Airbus A319 je dvoumotorové dopravní letadlo pro krátké a střední tratě s kapacitou 124 míst ve standardní úpravě a 156 míst v úpravě pro maximální počet cestujících. Typ byl certifikován v roce 1996.



*Obr. 4.14 Letoun Airbus A319 EI-EYL*

Měření se konalo 29.3.2013 za účasti čtyř osob včetně osoby oprávněné k provádění nedestruktivních zkoušek na letecké technice. Před zahájením měření bylo zjištěno, že se na povrchu kormidla nacházejí větší plochy se silnou vrstvou laku, které vznikly během lakování. Tato skutečnost by mohla natolik ovlivnit zkoušky, že by mohlo dojít k chybnému vyhodnocení obrazu. Proto se povrch v několika místech přebrousil (Obr. 4.15).



*Obr. 4.15 Viditelná přebroušena místa*

Jelikož byl v krátké době před měřením letoun přemístěn, nebyly k trupu přistaveny manipulační plošiny, proto se pro provedení všech činností musela využít plošina na rameni jeřábu, z toho důvodu byla pro nahřívání použita menší vzduchová pistole (Obr. 4.16) a byla snímána menší plocha směrového kormidla.



*Obr. 4.16 Nahřívání*

Byla použita termokamera Fluke Ti55FT (Obr. 4.17), která splňuje požadavky pro zkoušky uvedené v 4.2.3 a jejíž základní parametry jsou:

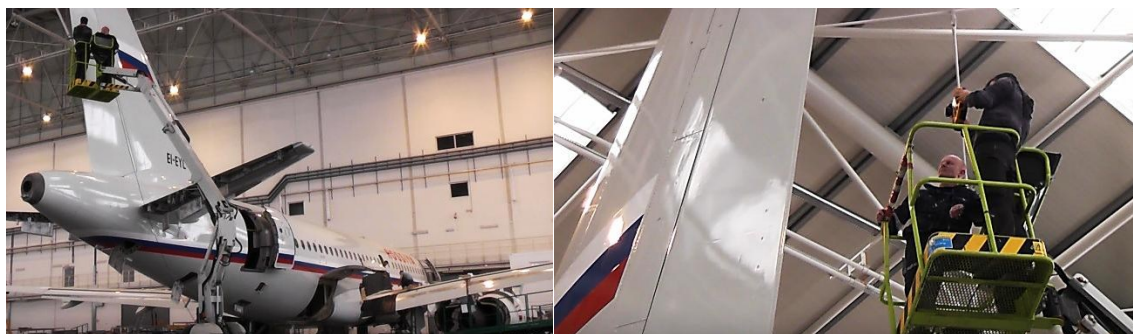
- citlivost  $\leq 0,05$  °C při 30 °C;
- teplotní rozsah -20 °C až 600 °C;
- barevná obrazovka (5 palců);
- minimální vzdálenost pro zaostření 150 mm;
- zorné pole  $23^\circ \times 17^\circ$ , což je méně, než stanoví požadavek, avšak je zde rozdíl jen velmi malý a při menší nahřívané ploše není tato odchylka znatelná;
- hmotnost 1,95 kg.



*Obr. 4.17 Termokamera Fluke Ti55FT [16]*

Při této zkoušce nebyl použit externí monitor, jelikož je obrazovka na samotné kameře dostatečně velká pro vstupní zhodnocení. Další rozbor lze pak provést pomocí softwaru, který je dodáván s kamerou. Jak je zřejmé, hodnota citlivosti, která představuje nejdůležitější parametr, značně převyšuje požadovanou hodnotu, takže je zajištěna

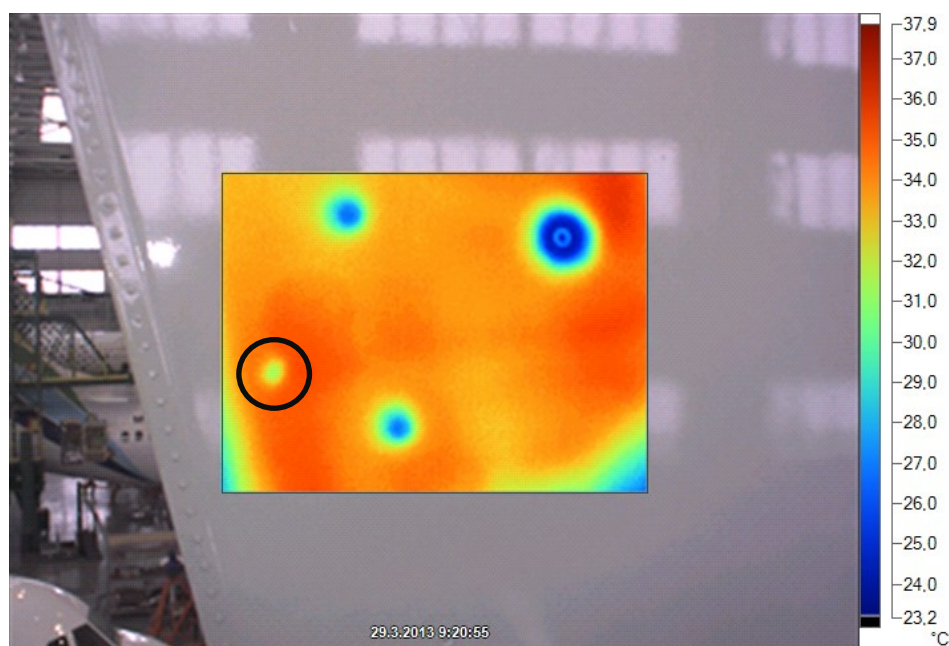
odhalitelnost podstatně méně zřetelných indikací, avšak existuje nebezpečí, že bude za vadu uznán jiný materiálový jev, proto je zde třeba dbát zvýšené pozornosti a v případě nejasnosti použít ultrazvukovou metodu nebo prozařování. Během samotné zkoušky byly zhotoveny snímky kontrolovaných míst pro další analýzu. Byl kladen důraz na nepřekračování povolené teploty ohřevu povrchu. Průběh je zdokumentován na Obr. 4.18.



*Obr. 4.18 Průběh měření*

#### 4.2.5 Výsledky měření a jejich hodnocení

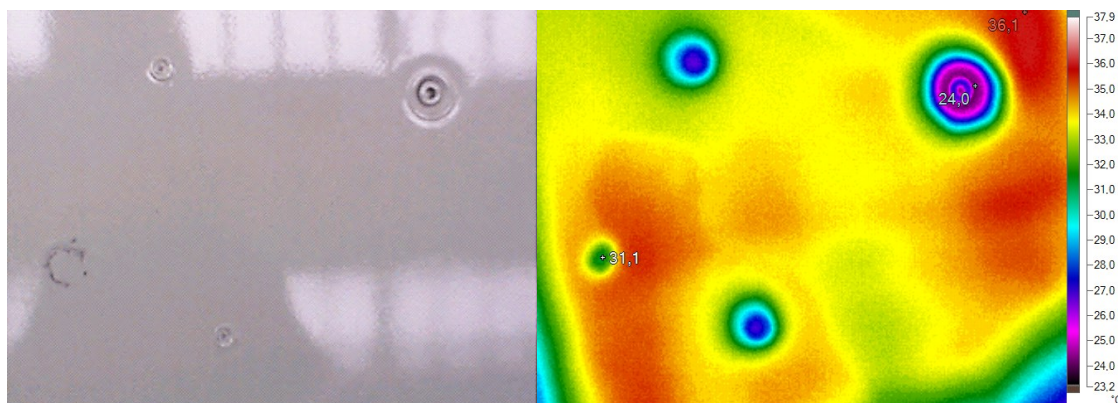
Zkoušce byl podroben omezený prostor směrového kormidla, na kterém existovalo podezření výskytu nálezu. Zde se objevilo chladnější místo, které bylo označeno. Jednalo se o přibližně kruhovitou indikaci s průměrem cca 20 mm. Na Obr. 4.19 Se jedná o chladnější místo zcela vlevo v měřené oblasti označené černým kroužkem.



*Obr. 4.19 Rozložení teploty ve zkoušené oblasti, zřetelná je poloha oblasti na směrovém kormidle*

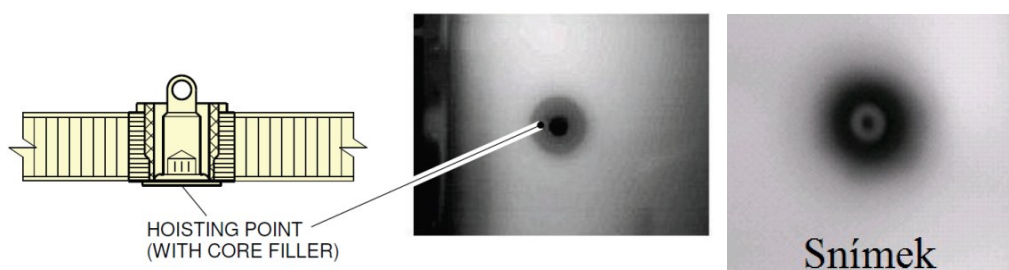


Na Obr. 4.20 vlevo je zmíněné místo označené černou barvou, vpravo je značka nejchladnějšího bodu tohoto místa, na kterém byla teplota 31,1 °C při emisivitě rovné 1. Další tři indikace pocházejí od šroubů, které jsou viditelné v levé části obrázku.



Obr. 4.20 Oblast ve viditelném a infračerveném spektru ve vysokém kontrastu zobrazení

Pro porovnání se vzorovými indikacemi jak je uvádí výrobce v [5] se pracuje se záznamy ve stupních šedi. Na Obr. 4.21 je vidět porovnání vzoru indikace šroubu a reálný snímek (označený jako Snímek). Rozdíl ve vzhledu je dán skutečností, že vzorová indikace zobrazuje jiný typ šroubu, avšak je zřejmé, že je zobrazení správné, což zaručuje, že i indikace vady se zobrazí obdobně, jako ve vzoru.

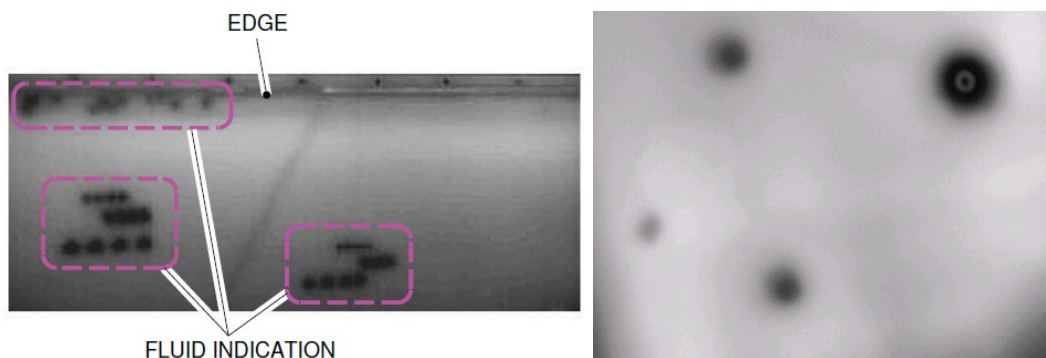


Obr. 4.21 Vzorová indikace šroubu (vlevo) [5] a reálný snímek

Dle směrnic uvedených v 4.2.3 indikace přesahovala velikost, od které je třeba přistoupit k další analýze měření. Proto bylo vhodné dál zkoumat zákonitosti při vyhodnocování zkoušky. Parametrem, který mohl mnoho říci o povaze nálezu, byl jeho tvar. Především při intenzivnějším nahřívání se voda v buňkách zobrazuje jako ostrými hranami ohraničené chladnější plochy, které mají navíc různou teplotu v závislosti na obsahu tekutiny. V případě zkoumaného nálezu se jednalo o jednu větší chladnější plochu přibližně kruhovitěho tvaru s neostrými hranami. Právě pozvolný přechod teploty na

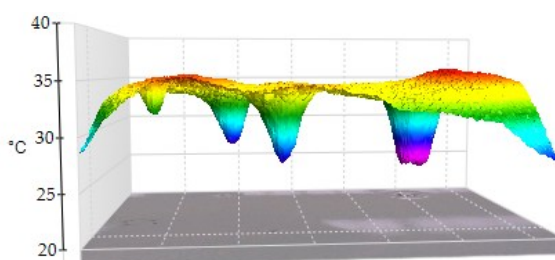


okrajích indikace vedl k závěru, že se nejedná o nález přítomnosti vody v buňkách voštiny, nýbrž je zdroj indikace jiný. Gradient teploty je viditelný na 3D snímku (Obr. 4.23). Také samotný tvar oblasti není typický pro hledanou vadu (viz Obr. 4.22). Povrch potahu byl přitom naprosto neporušen, bez známek jakékoli ingerence.



Obr. 4.22 Typický vzhled vady (vlevo) [5] a reálný snímek (vpravo)

Vzhledem k uvedeným okolnostem lze říci, že indikace má svůj původ v opravě, která byla provedena před nanesením stávajícího laku na potah letounu. S nejvyšší pravděpodobností se jednalo o tmel, kterým byla provedena oprava povrchového poškození. To mohlo vzniknout nárazem cizího předmětu na povrch směrového kormidla, přičemž nedošlo k roztržení potahové vrstvy, případně mohla toto poškození způsobit obsluha. Záznam o opravě by měl být uložen v dokumentaci předchozího provozovatele po dobu pěti let od ukončení provozu letounu. Jelikož nový provozovatel zahájil provoz letounu v prosinci 2012, lze předpokládat, že v době provádění a vyhodnocování této zkoušky byla dokumentace archivována u předchozí letecké společnosti a na vyžádání by mohla být zpřístupněna. Malý povrchový rozsah indikace a vysoká pravděpodobnost předpokládaného zdroje indikace ale nevyžadovaly tyto kroky. Záznam o indikaci včetně fotografického materiálu bude uložen v databázi a v budoucnu jej bude možné porovnat s výsledky případných dalších zkoušek stejné oblasti.



Obr. 4.23 Trojrozměrné zobrazení průběhu teplot v měřené oblasti

## 5 ZÁVĚR

Pro údržbu letecké techniky jsou nedestruktivní metody technické diagnostiky velmi důležitým oborem. Jejich použití je čím dál širší a lze v tomto směru očekávat další vývoj. Díky neustálému výzkumu nad novými technologiemi jsou náklady na údržbu stále snižovány a stávající metody jsou tak pořád dostupnější. Každá metoda má jistá omezení, avšak kombinací více metod lze dosáhnout velké univerzálnosti NDT pracoviště působícího v organizaci pro údržbu letadel a také proto je přínosné zkoušet inovační metody, které je možno takto využít. Legislativní omezení v civilním letectví, obzvláště pak tom evropském, jsou v porovnání s jinými odvětvími průmyslu značná, proto zde není jednoduché novinky tohoto druhu zavádět.

Metoda magnetické paměti kovů jako nová a nepříliš známá je předmětem teoretických úvah a výzkumů, co se týče uplatnění v letectví. V současné podobě se jeví jako příliš univerzální. Pro tuto aplikaci je nutná větší specializace, zaměření na konkrétní vady, které by bylo teoreticky možné detekovat a nakonec vytvoření takových hardwarových a softwarových podmínek, aby se dosáhlo požadovaných výsledků. Nejjistější cestou se zdá být použití metody MMM pro ty objekty, pro které je využívána metoda rozptylových toků s tím, že by nová metoda byla schopna odhalit pravděpodobné vady ještě před jejich vznikem, což by mohlo znamenat velký krok napřed při objektivizaci technického stavu letadel a zvyšování jejich provozní spolehlivosti, k čemu již došlo v jiných odvětvích, kde byla metoda aplikována.

Termovizní metoda již v údržbě letadel našla uplatnění, což se odrazilo v příslušné dokumentaci. Je ovšem třeba zdůraznit, že zároveň není považována za metodu stoprocentní, tedy v případě výskytu možné vady je nutné provést kontrolu pomocí jiných technik, které si v oboru nedestruktivních metod technické diagnostiky v údržbě letadel získaly jisté postavení. Je zřejmé, že vzhledem k poměrně jednoduchému principu práce a dalším výhodám, jako je bezkontaktnost, absence zdraví nebezpečného záření, možnost použití na všechny druhy materiálů, apod., si najde v blízké budoucnosti výsadnější místo v této oblasti.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOPEC, B. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (Nauka o materiálu IV)*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [2] LEWIŃSKA-ROMICKA, A. *Badania nieniszczące: podstawy defektoskopii*. 1. vyd. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2001, 600 s. ISBN 83-204-2641-3.
- [3] STRNADEL, B. *Nauka o materiálu*. 2. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2004, 180 s. ISBN 978-80-248-0689-1.
- [4] BLATA, J., JURASZEK, J. *Metody technické diagnostiky – teorie a praxe*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2013. 131 s.
- [5] *Airbus A318/A319/A320/A321 Nondestructive Testing Manual – Thermography*. Toulouse: Airbus S.A.S., 2012, 27 s.
- [6] WITOŚ, M., WIŚNIOCH, M. *Metoda magnetycznej pamięci metalu w diagnostowaniu techniki lotniczej*. Warszawa: Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Energodiagnostyka, 2009, 12 s.
- [7] BOHÁČOVÁ, M. *Rešerše NDT metod používaných v letectví*. Praha: Výzkumný a zkušební letecký ústav, 2011, 8 s.
- [8] *AC 43.13-1B: Acceptable Methods, Techniques and Practices – Aircraft Inspection and Repair*. Washington: U.S. Department of Transportation, 1998, 56 s.
- [9] *Ultrasonic Testing for Aircraft*. Washington: U.S. Department of Transportation, 1975, 39 s.
- [10] *Visual Inspection for Aircraft*. Washington: U.S. Department of Transportation, 1997, 242 s.
- [11] OCZOŚ, K. *Kompozyty włókniste – właściwości, zastosowanie, obróbka ubytkowa*. Warszawa: Mechanik Miesięcznik Naukowo – Techniczny, 7/2008, 9 s.
- [12] SIMONS, D., WITHINGTON, T. *Historia lotnictwa: od pierwszych dwupłatowców po podbój kosmosu*. Bath: Parragon, 2008, 384 s. ISBN 978-140-7520-070
- [13] *Konsolidované znění nařízení Komise (ES) č. 2042/2003*. Bruxelles: Komise ES, 2008, 225 s.

- [14] KOŘÍNEK, Z. *Kompozity*. [online], [cit. 23. března 2013]. Dostupné z WWW.: <<http://www.volny.cz/zkorinek/>>
- [15] *EI-EYL Rossiya - Russian Airlines Airbus A319-111*. [online], [cit. 2. května 2013]. Dostupné z WWW.: <[http://www.planespotters.net/Production\\_List/Airbus/A319/2465,EI-EYL-Rossiya-Russian-Airlines.php](http://www.planespotters.net/Production_List/Airbus/A319/2465,EI-EYL-Rossiya-Russian-Airlines.php)>
- [16] *Fluke Ti50FT and Ti55FT IR FlexCam Thermal Imagers with IR-Fusion Technology*. [online], [cit. 15. dubna 2013]. Dostupné z WWW.: <<http://www.fluke.com/Fluke/usen/Thermal-Cameras/Fluke-Ti50-Series.htm?PID=56188>>
- [17] *Aviation Safety Network*. [online], [cit. 3. dubna 2013]. Dostupné z WWW.: <<http://aviation-safety.net/database>>
- [18] *Výukové materiály předmětu Letecká legislativa*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, Ústav letecké dopravy, 2010.